

不同造林抚育干扰下桉树幼林地水土流失特征

梁宏温¹, 马倩¹, 温远光¹, 郭晋川², 杨健基³

(1. 广西大学 林学院, 广西 南宁 530004;

2. 广西水利科学研究所, 广西 南宁 530023; 3. 广西金桂林业有限公司, 广西 南宁 530021)

摘要: [目的] 探讨不同造林抚育措施对桉树幼林地水土流失及其养分损耗的影响, 为桉树人工林的科学栽培和可持续经营提供理论依据。[方法] 建立 8 个地表径流小区, 以桉树采伐地灌草坡做对照(CK), 研究人工割灌割草清理林地和除草、只施基肥不追肥的植苗更新 2 代林地(A 处理), 火烧清理林地、化学除草、施基肥和追肥的植苗更新 2 代林地(B 处理)和人工割灌割草清理林地和除草、施基肥和追肥的萌芽更新 2 代林地(C 处理)的水土流失特征。[结果] B 处理林地的地表径流量、泥沙流失量和 N, P, K 养分流失总量年均值分别为 129.35 mm, 642.52 kg/(hm²·a) 和 32.923 kg/(hm²·a), 比 A 处理的分别高出 7.93%, 90.03% 和 46.89%, 比 C 处理的分别高出 4.95%, 70.82% 和 49.17%, 比 CK(对照)的分别高出 4.98%, 109.93% 和 50.91%; 各试验林地的地表径流量和泥沙流失量与降水量之间均呈极显著线性正相关($R=0.717\sim 0.853$)。[结论] 火烧清理林地、化学除草、频繁施肥等人为干扰活动及大量级降水驱动是桉树幼林地水土流失及其养分损耗较为强烈的主要原因。

关键词: 桉树幼林; 火烧清理林地; 人工除草; 化学除草; 林地施肥; 地表径流; 养分流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0026-05

中图分类号: S718

文献参数: 梁宏温, 马倩, 温远光, 等. 不同造林抚育干扰下桉树幼林地水土流失特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 026-030. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.005

Features of Soil and Water Loss of *Eucalypt* Young Forest Under Different Afforestation-tending Disturbances

LIANG Hongwen¹, Ma Qing¹, WEN Yuanguang¹, GUO Jinchuan², YANG Jianji³

(1. Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Guangxi Hydraulic Research Institute, Nanning, Guangxi 530023, China; 3. Guangxi Jingui Forestry Co. Ltd., Nanning, Guangxi 530021, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion and nutrients loss of *Eucalyptus* young forest by different kinds of afforestation and tending measures were studied to promote the scientific management of *Eucalyptus* plantation. [Methods] Two runoff plots in each of three afforestation-tended lands (management treatments A, B and C) and of a *Eucalypt*-deforested land (CK) were set up to study the characteristics of soil erosion and water loss of *Eucalyptus* young forest. Management A was located on a regenerated *Eucalypt* seedling land with basic fertilization but no topdressing after the woods and weeds were manually cut and removed. Management B was on a regenerated seedling forest land with both of basic fertilization and topdressing after of fire clearing and chemical weeding. Management C was on a sprout regenerated forest land with both of basic fertilizing and topdressing after it was artificially cleared of woods and weeds. [Results] The annual average of surface runoff, sediment erosion and the total nutrients losses of N, P, K of management B were 129.35 mm, 642.52 kg/(hm²·a) and 32.923 kg/(hm²·a), respectively, which were higher than that of A-manage by 7.93%, 90.03% and 46.89%, respectively; and were higher than that of C-manage by 4.95%, 70.82% and 49.17%, respectively; and also were higher than that of CK by 4.98%, 109.93% and 50.95%, respectively. There were extremely significant and positive linear correlations among rainfall, the surface flow and the sediment erosion of the experiment woodlands ($R=0.717\sim 0.853$). [Conclusion] Artificial interferences such

收稿日期: 2016-05-12

修回日期: 2016-06-02

资助项目: 水利部公益性行业科研专项项目“速生桉树人工林对水库的生态效应与影响研究”(201301044)

第一作者: 梁宏温(1959—), 男(汉族), 广西壮族自治区贵港市人, 学士, 研究员, 主要从事森林生态学研究。E-mail: lhwen59@163.com。

as clearing land with fire, chemical weeding, frequently fertilization, and a large number of precipitation level are the main causes of heavy soil erosion and the nutrient loss of *Eucalyptus* young forest woodland.

Keywords: *Eucalyptus* young forest; clearing woodland with the fire; artificial grass cutting; chemical weeding; forest fertilization; surface runoff; nutrient loss

由于桉树人工林的经济效益好,广西近 20 a 来广泛栽培,现有林地面积 $2.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。然而,桉树人工林短周期经营和采取火烧清理林地、全垦整地、化学除草和多次频繁追肥等不科学的营林措施,会引发桉树林地生物多样性降低^[1]、水土流失^[2-3]、水源涵养功能减弱^[4]和土壤肥力下降^[5-6]等生态安全问题。目前,国内针对桉树人工林水土流失及养分损耗的研究已有一些报道。赵一鹤等^[7]对巨尾桉工业原料林地、灌木林地和荒草地的坡面产流产沙量进行对比研究,结果显示,产流量大小依次为:荒草地>灌木林地>巨尾桉工业原料林地,产沙量大小顺序为:灌木林地>荒草地>巨尾桉工业原料林地,表明桉树人工林具有一定的水土保持功能。覃其云等^[8]研究间种牧草对桉树林地水土流失及其养分损耗的影响,认为间种牧草(桂牧 1 号象草)能有效减少桉树林地的地表径流量,土壤侵蚀量则因牧草种植等人为耕作活动影响而有所增加,从而导致间种牧草的桉树林地养分流失量高于桉树纯林林地。黄承标等^[9]连续 6 a 定位观测巨尾桉人工林的地表径流规律,结果表明,桉树林地在造林当年和第 2 a 的地表径流量和土壤侵蚀量均较高,随着林龄的增加,地被物(林下灌草植被和枯枝落叶层)对雨水的截留和吸附作用加强,其地表径流量和土壤侵蚀量均明显下降。上述诸多方面对桉树人工林水土保持效应的研究,揭示了桉树林地水土流失强度主要与所采取的造林抚育措施有关。目前,桉树生产上应用的造林抚育技术主要包括采用火烧或人工割灌割草方式清理林地,全垦整地、带状整地或挖穴整地,植苗更新或伐根留萌更新,施基肥和追肥,采用人工割灌割草或使用化学除草剂对幼林地进行除草等。本文研究不同造林抚育措施干扰下桉树幼林林地的产流产沙量及其养分流失量,并阐明桉树幼林林地的水土流失特征及其影响因素,为桉树人工林的科学栽培和可持续经营提供理论根据。

1 材料与方 法

1.1 自然条件

试验区位于广西横县新福镇,东经 $108^{\circ}51' - 108^{\circ}55'$,北纬 $22^{\circ}30' - 22^{\circ}36'$,海拔 80~160 m,属于亚热带季风气候区,年均气温 21.5°C ,最热月(8月)均温 27.3°C ,极端最高温 39.2°C ,最冷月(1月)均温 12.1°C ,极端最低温 -1.2°C ,年均降水

量 1334.6 mm ,年均日照 1758.9 h ,年均蒸发量 1655.1 mm ,年均无霜期 338 d。地带性土壤为花岗岩(杂有部分第四纪红土)风化形成的砖红壤,土层厚 80~110 cm;地带性森林植被为南亚热带常绿阔叶林,但已荡然无存,并转变为桉树(*Eucalypt*)和马尾松(*Pinus massoniana*)等人工林植被。

1.2 试验地及径流小区设计

在广西南宁市横县新福镇公净水库的东南面,于同一山丘西北坡的中坡设计 4 种试验地(处理),分别记为 A, B, C 和 CK。其中, A 为人工割灌割草清理林地和除草、只施基肥不追肥的植苗更新 2 代林地, B 为火烧清理林地、化学除草、施基肥和追肥的植苗更新 2 代林地, C 为人工割灌割草清理林地和除草、施基肥和追肥的萌芽更新 2 代林地, CK 为对照林地(采伐桉树萌芽 1 代 3 年生林分,人工清理采伐剩余物和砍掉桉树的伐根萌芽,保留林地上的灌草植物,让其自然恢复生长形成的灌草坡地)。在试验地上,选择坡度和坡形较相近的直线坡地段,各设计 2 个地表径流小区,每个径流小区面积 100 m^2 ($20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),其长边与等高线垂直,短边与等高线平行。在每个径流小区的上坡边缘与两边用砖砌成挡水墙,墙面高出地表 15~20 cm,下坡边筑集水沟,集水沟深 20 cm,底宽 20 cm。集水池容积为 2.16 m^3 ,其底面积 1.8 m^2 ($1.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$),高 1.2 m,集水池上面盖挡水板。各试验地的造林抚育措施及其径流小区的立地条件详见参考文献^[10]。

1.3 大气降水量观测

在公净水库附近的地形开阔处架设一台 JD-05 型翻斗式自记雨量计(徐州市伟思水务科技有限公司生产),雨量计分辨率为 0.1 mm ,用来观测每场降雨的降水量及其降水过程;使用 YD-1003 型遥测终端机(徐州市伟思水务科技有限公司生产)自动采集数据,每隔 5 min 记录 1 次(降水量有变化时,每隔 1 min 记录 1 次);按每天、每月和每年统计降水量。

1.4 地表径流量和泥沙流失量观测

于 2013 年 7 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日,在每次降雨后,于次日 8:00,用钢尺测量每个径流小区的集水池中 4 个底角的径流水高度(读数至 1 mm),然后计算平均值,分别计算出 1 次(或每天)降雨过程的地表径流量(mm)。在每次测量集水池中的径流水高度后,全部排出池中的浑水,并用塑料壶收取浑水

样(1 L)带回室内,经沉淀和过滤,求算其泥沙含量(g/L);同时,将集水池内的淤泥全部取出称量,经烘干求算淤泥流失量(10^{-2} kg/m²),根据水样泥沙含量和淤泥流失量计算出林地的泥沙流失量(kg/hm²)。

1.5 样品采集和化学分析

于2013年7月1日至2015年12月31日,分别不同年度、不同季节、不同降雨强度和不同径流小区进行采样。每次于集水池中采集并经充分搅拌均匀的径流水样各1份,每份约1 L。采用《中华人民共和国国家标准(GB3838-2002)》^[11]测定水样中的氮、磷、钾等元素含量。其中:氮含量采用凯氏法,磷含量采用钼蓝比色法,钾含量采用火焰光度法。在采集水样后,收集不同径流小区集水池中的泥沙,经充分搅拌均匀后各取样1 kg。于室内经自然风干后,采用《中华人民共和国林业行业标准 LY/T1999》^[12]测定泥沙的有机质、氮、磷、钾等养分含量。其中,有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法,全氮采用半微量凯氏法,全磷采用氢氧化钠碱熔提取待测液-钼蓝比色法,全钾采用氢氧化钠碱熔法提取待测液-火焰光度计法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用双酸(盐酸和硫酸)浸提-钼蓝比色法,速效钾用1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度计法。

1.6 统计分析

采用 Excel 和 SPSS 16.0 软件对观测数据进行统计分析,计算平均数、标准差、变异系数,并作差异显著性检验和回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同造林抚育措施的桉树幼林地产流产沙量及其影响因素

2.1.1 产流产沙量比较 由表1可以看出,各处理林地的地表径流量和泥沙流失量均存在较大的差异,尤以泥沙流失量的差异更明显($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。

根据表1计算得知,B处理林地的年均产流量为

129.35 mm,比A处理、CK(对照)和C处理林地的分别高7.93%,4.98%和4.95%。随着林龄的增加,林下地被物得到了逐渐恢复,上述各处理之间的差异在逐年变少,由2013下半年度的14.80%,10.58%和13.65%下降为2014年度的11.56%,6.41%和5.06%,再下降至2015年度的3.08%,1.36%和0.10%。B处理林地的年均泥沙流失量为642.52 kg/(hm²·a),比CK(对照)、A处理和C处理林地的分别高109.93%,90.03%和70.82%,尤以降水偏少的2014年度,其泥沙流失量的差异更大,分别达到407.96%,141.95%和107.65%。究其原因,主要在于B处理一方面是采用火烧清理林地和使用化学除草剂对幼林地进行除草抚育,致使林地上的活地被物和死地被物大量损失,导致林地表面大部分裸露,从而减弱了地被物对降水的截留和吸附作用;另一方面是在每次追肥时均对树兜附近的表层土壤进行局部翻垦而使其疏松,致使表层土壤和地被物更容易被雨水冲刷,2个方面的组合使得B处理对林地的干扰较频繁和剧烈,从而产生较高的地表径流量和泥沙流失量。而A处理仅在造林时采用人工割灌割草(只割除地上部分,保留地下根系部分)清理林地和局部挖穴整地,结合整地时一次性施基肥于穴底并用表层土覆盖,对幼林的抚育只进行人工割灌割草而不再进行追肥,这些措施能有效减少对林下地被物和表层土壤的破坏,使A处理的林地地被物保存较好,充分发挥林下地被物截留降水和保护土壤的功能,从而有效地控制了林地的水土流失和对施肥的冲刷作用,使其坡面产流产沙量相对较低。CK(对照)为桉树采伐地形成的灌草坡地,由于采伐林木和清理林地当时的人为践踏及伐倒木对表层土壤的磨擦或冲击作用,也部分地损坏了林地的地被物,从而导致采伐当年(2013年)的地表径流量和泥沙流失量较高(表1)。C处理要进行幼林追肥,其对林地的干扰强度稍强于A处理,但远比B处理来得弱,故其水土流失强度介于两者之间。

表1 不同处理林地的地表径流量和泥沙流失量

年份	地表径流量/mm				泥沙流失量/(kg·hm ⁻²)			
	A处理	B处理	C处理	CK(对照)	A处理	B处理	C处理	CK(对照)
2013	91.92 ^a ±8.25	105.52 ^b ±11.12	92.85 ^a ±7.65	95.42 ^a ±9.03	737.91 ^a ±18.14	1354.52 ^c ±43.37	808.65 ^a ±16.46	700.52 ^a ±17.17
2014	44.23 ^a ±5.12	49.34 ^b ±6.03	46.96 ^a ±4.76	46.37 ^a ±5.91	92.55 ^b ±10.04	223.92 ^c ±19.36	107.84 ^b ±9.57	44.08 ^a ±6.34
2015	163.47 ^a ±11.12	168.51 ^a ±15.07	168.34 ^a ±13.28	166.25 ^a ±12.71	14.84 ^a ±3.37	27.87 ^c ±4.19	23.86 ^b ±2.67	20.55 ^b ±2.25
平均	119.85 ^a ±9.06	129.35 ^b ±11.24	123.25 ^a ±9.56	123.22 ^a ±10.53	338.12 ^a ±15.54	642.52 ^c ±28.26	376.14 ^a ±21.17	306.06 ^a ±18.63

注:表中的数据为平均值±标准差,同一行的相邻字母表示不同处理之间差异显著($p < 0.05$),相隔字母表示不同处理之间差异极显著($p < 0.01$);经各月平均值加权。下同。

2.1.2 降水量对产流产沙量的影响 根据 2013 年 7 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日观测,期间有 196 d 产生降雨,总降水量 3 748.8 mm,年均降水量 1 334.6 mm(经各月降水量加权平均)。参照《地面气象观测规范》^[13],对 B 处理的产流量和泥沙流失量按各雨量级进行统计(表 2)。结果显示,大暴雨(100~249.9 mm)天气 4 次,均产生地表径流,其径流量和泥沙流失量分别占总量的 25.15% 和 58.04%;暴雨(50~99.9 mm)天气 13 次,均产生地表径流,其径流量和泥沙流失量分别占总量的 30.45% 和 28.87%;大雨(25~49.9 mm)天气 18 次,有 16 次产生地表径流,其径流量和泥沙流失量分

别占总量的 22.09% 和 8.17%;中雨(10~24.9 mm)天气 64 次,只有 25 次产生地表径流,其径流量和泥沙流失量分别占总量的 21.17% 和 4.52%;小雨(<10.0 mm)天气 97 次,仅有 6 次产生地表径流,其径流量和泥沙流失量分别占总量的 1.15% 和 0.40%。

由表 2 看出,不同雨量级的地表径流系数(径流量占降水量比率)大小序列(暴雨>大雨>大暴雨>中雨>小雨)与土壤侵蚀模数(年泥沙流失总量)的大小序列(大暴雨>暴雨>大雨>中雨>小雨)略有不同,但都是以大雨量级较强,小雨量级较弱,反映了降水量(雨强)对林地水土流失的严重影响。

表 2 各雨量级的径流系数和土壤侵蚀模数

雨量级	雨次	降水量		产流次数	径流量		径流系数	泥沙量		侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
		数值/mm	比例/%		数值/mm	比例/%		数值/(kg·hm ⁻²)	比例/%	
小雨	97	539.4	14.39	6	3.42	1.15	0.63	3.62	0.40	0.14
中雨	64	1 050.2	28.01	25	63.22	21.17	6.02	40.60	4.52	1.62
大雨	18	616.5	16.45	16	65.96	22.09	10.70	73.38	8.17	2.94
暴雨	13	822.9	21.95	13	90.95	30.45	11.05	259.36	28.87	10.37
大暴雨	4	719.8	19.20	4	75.10	25.15	10.43	521.51	58.04	20.86
合计	196	3 748.8	100.00	64	298.65	100.00	—	898.47	100.00	—

注:小雨(<10 mm),中雨(10~24.9 mm),大雨(25~49.9 mm),暴雨(50~99.9 mm),大暴雨(100~249.9 mm)。

以降水量为自变量,地表径流量和泥沙流失量为因变量,进行回归分析(表 3)。表 3 显示,各试验处理的地表径流量和泥沙流失量与降水量均呈线性正相关($R=0.717\sim 0.853$),其检验值(F)均达极显著水平($p<0.01$),表明试验林地的地表径流量和泥沙

流失量是受到降水量的强烈影响。

根据表 3 所给出的回归方程式,由降水量可以估算出不同造林抚育措施干扰下的地表径流量及其泥沙流失量,这为类似地区桉树人工林的水土流失量评估提供了测算依据。

表 3 地表径流量(y_1)和泥沙流失量(y_2)与降水量(x)的线性回归分析

处理	地表径流量				泥沙流失量			
	回归方程	相关系数 R	检验值 F	显著性 p	回归方程	相关系数 R	检验值 F	显著性 p
A	$y_1=1.265+0.075x$	0.746	77.71	0.01	$y_2=0.675x-14.083$	0.841	149.79	0.01
B	$y_1=0.941+0.102x$	0.819	126.73	0.01	$y_2=1.384x-30.882$	0.853	165.45	0.01
C	$y_1=1.518+0.082x$	0.717	65.64	0.01	$y_2=0.779x-16.807$	0.851	161.52	0.01
CK	$y_1=1.359+0.085x$	0.737	73.66	0.01	$y_2=0.568x-11.016$	0.788	101.33	0.01

2.2 不同造林抚育措施的桉树幼林地表养分流失量

2.2.1 地表径流水主要化学成分含量 不同处理林地径流水样的主要化学成分含量平均值和标准差列于表 4。由表 4 可以看出,B 处理的总 N、总 P、总 K 平均含量相对较高、差异显著($p<0.05$),其他处理的相对较低、且差异不显著($p>0.05$)。若对照地表水环境质量标准(GB 3838-2002)^[11],各处理林地的径流水质均较差,其中:总 N 为劣 V 类(>2 mg/L),

总 P 为 III—V 类(0.2~0.4 mg/L),尤以 B 处理林地的更差($p<0.05$)。为了促进桉树生长,在桉树幼龄期都要额外追施化肥(N,P,K 复合肥料),除供给桉树生长吸收外,还有一部分化肥因为地表径流的冲刷而流失^[14],再加上降雨对桉树林冠层及其枯枝落叶等地被物的淋洗作用,从而导致径流水中的养分含量增高,水质变差,呈现富营养化反应,并以 B 处理林地的表现最突出。

表 4 不同处理林地地表径流水的养分含量

mg/L

处理	pH 值	总 N	总 P	总 K
A	6.533 ^a ±0.781	2.693 ^a ±1.222	0.271 ^a ±0.144	14.221 ^a ±9.523
B	6.418 ^a ±0.827	3.327 ^b ±1.452	0.374 ^b ±0.189	18.743 ^b ±13.868
C	6.462 ^a ±0.853	2.611 ^a ±1.306	0.283 ^a ±0.172	13.501 ^a ±9.353
CK	6.461 ^a ±0.762	2.649 ^a ±1.201	0.261 ^a ±0.163	13.581 ^a ±9.430

2.2.2 地表径流泥沙主要化学成分含量 不同处理林地径流泥沙的有机质和 N,P,K 含量的平均值和标准差列于表 5。由表 5 可以看出,B 处理的有机

质和 N,P,K 全量及其速效含量的平均值相对较高、差异显著($p < 0.05$),其他处理的相对较低、且差异不显著($p > 0.05$)。

表 5 不同处理林地地表径流泥沙的养分含量

处理	pH 值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	碱解 N/ (mg·kg ⁻¹)	有效 P/ (mg·kg ⁻¹)	速效 K/ (mg·kg ⁻¹)
A	6.776 ^a	29.854 ^a	1.185 ^a	0.197 ^a	3.987 ^a	47.882 ^a	11.286 ^a	128.440 ^a
B	6.730 ^a	36.407 ^b	1.681 ^b	0.239 ^b	4.532 ^b	61.836 ^b	15.736 ^b	147.796 ^b
C	6.812 ^a	30.241 ^a	1.121 ^a	0.195 ^a	3.681 ^a	47.568 ^a	11.418 ^a	124.158 ^a
CK	6.647 ^a	27.849 ^a	1.151 ^a	0.173 ^a	3.576 ^a	48.260 ^a	11.616 ^a	124.078 ^a

2.2.3 地表径流养分流失量 用年均地表径流量和泥沙流失量(表 1)分别乘以径流水的养分含量(表 4)和径流泥沙的养分全量值(表 5)获得林地年均径流水养分流失量和泥沙养分流失量,将两者相加即为地表径流的养分流失量(表 6)。经表 6 计算得知,B 处理林地随地表径流流失的 N 为 5.133 kg/hm²,较 CK(对照)、A 和 C 处理林地的分别高 42.11%,41.52%和 41.25%;P 为 0.633 kg/hm²,比 CK(对照)、A 和 C 处理林地的分别高 68.80%,60.66%和

52.16%;K 为 27.157 kg/hm²,比 CK(对照)、C 和 A 处理林地的分别高出 52.31%,50.70%和 47.65%。B 处理林地的地表径流养分(N,P,K)流失总量为 32.923 kg/(hm²·a),比同是植苗更新 A 处理的高出 46.89%,比萌芽更新 C 处理的高出 49.17%,比 CK(对照)的高出 50.91%。B 处理林地的养分流失量较高是与其年均水土流失量(表 1)及其养分含量(表 4—5)均较高有关。

表 6 不同处理林地地表径流养分流失量

kg/(hm²·a)

处理	径流水养分流失量				泥沙养分流失量				地表径流养分流失量			
	N	P	K	合计	N	P	K	合计	N	P	K	合计
A	3.226	0.327	17.045	20.598	0.401	0.067	1.348	1.816	3.627	0.394	18.393	22.414
B	4.053	0.480	24.245	28.778	1.080	0.153	2.912	4.145	5.133	0.633	27.157	32.923
C	3.212	0.343	16.636	20.191	0.422	0.073	1.385	1.880	3.634	0.416	18.021	22.071
CK	3.260	0.322	16.735	20.317	0.352	0.053	1.095	1.500	3.612	0.375	17.830	21.817

3 讨论和结论

(1) 不同造林抚育措施干扰下桉树幼林地各处理之间的水土流失量及其养分损耗量均存在较大的差异,其中以 B 处理对林地的干扰较频繁和剧烈,从而导致其产生较高的水土流失量和养分损耗量,这一现象与覃其云等^[8]的研究结论相符。随着林龄的增加,对幼林地的干扰(除草和施肥)强度逐渐减弱直至停止,各试验林地的泥沙流失量均表现出逐年下降趋势,尤以 B 处理的表现最为突出,这一趋势与王会利等^[3]和黄承标等^[9]的研究结论相一致。

(2) 在地形、土壤和降水等条件相同或相近的情况下,采用火烧清理林地、化学除草和幼林地频繁追肥的林地管理措施,导致桉树幼林地产生较高的产流产沙量和养分流失量;而采用人工割灌割草方式清理林地和幼林地除草、一次性施基肥而不再进行幼林地追肥的林地管理措施,能有效地减少了桉树幼林地的产流产沙量及其养分流失量。因此,从生态安全和环境保护的角度出发,建议在桉树营林生产上推广应用“人工除草”和“只施基肥不施追肥”的林地管理技术,应避免使用“火烧炼山”和“除草剂除草”的林地干扰措施。

(下转第 39 页)

基于轨迹分析的 2003—2010 年华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响研究

辛 强, 李兆富, 李瑞娟, 郭 泰, 吴 敏, 潘剑君

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: [目的] 分析华东地区土地覆被变化过程对土壤水分的影响, 以期能够揭示土地覆被变化对土壤水分的影响机理。[方法] 应用 MODIS 三级土地覆被产品 $MCD_{12}Q_1$, 采用轨迹分析方法描述 2003—2010 年耕地和林地轨迹变化过程; 选择基于 AMSR-E 土壤水分数据的降尺度反演结果作为描述土壤水分变化的数据, 研究华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响。[结果] (1) 每种土地覆被类型均有 3 种轨迹变化形式: 研究年限内面积增加的轨迹、面积减少的轨迹、研究年限内未发生面积变化的轨迹; (2) 在耕地和林地 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量均表现出下降的趋势。(3) 在林地的 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量大小顺序为: 未发生轨迹变化的林地 > 林地面积增加的轨迹 > 林地面积减少的轨迹; 在耕地的 3 种轨迹变化过程中, 土壤水分含量大小排序为: 耕地面积减少的轨迹 > 耕地面积增加的轨迹 > 未发生轨迹变化的耕地; (4) 耕地、林地轨迹变化过程对土壤水分的影响均与时间年限有关, 至少需要 7 a 林地土壤水分含量达到最大值, 此时耕地土壤水分含量达到最小值。[结论] 作为华东地区主要的土地覆被类型, 耕地和林地 在 2003—2010 年的所有变化轨迹过程中, 土壤水分均呈现下降趋势, 且土壤水分随着育林年限和耕种年限的增长分别增加和减小, 并在第 7 a 分别达到最大和最小。

关键词: 华东地区; 土壤水分; 轨迹分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0031-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 辛强, 李兆富, 李瑞娟, 等. 基于轨迹分析的 2003—2010 年华东地区土地覆被变化对土壤水分的影响研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 031-39. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.006

Impacts of Land Cover Change on Soil Moisture in 2003—2010 Based on Trajectory Analysis

XIN Qiang, LI Zhaofu, LI Ruijuan, GUO Tai, WU Min, PAN Jianjun

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] Studying the links of the change process of vegetation cover and soil moisture in East China, to reveal the impact mechanism of the former to the later. [Methods] This research described the variation of cropland and forest by trajectory analysis using MODIS $MCD_{12}Q_1$ and researched the soil moisture variation caused by land cover change on the basis of AMSR-E soil moisture data with high spatial resolution. [Results] (1) All kinds of land cover existed three forms: afforestation trajectory; deforestation trajectory; permanent trajectory. (2) Soil moisture showed decreasing tendency in all the trajectories of cropland and forest. (3) For forest trajectories, the order of soil moisture was: permanent forest trajectory > afforestation forest trajectory > deforestation forest trajectory; while for cropland trajectory, the rank was deforestation cropland trajectory > afforestation cropland trajectory > permanent cropland trajectory. (4) The variation of soil moisture caused by land cover was affected by their ages. E. g., soil moisture under forest would take for more than 7 years to reach its maximum capacity, while in cropland, it was minimum at this age.

收稿日期: 2016-01-13

修回日期: 2016-03-11

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“全球气候背景下基于多源遥感数据的地表关键参量反演研究”(KYZ201522); 国家自然科学基金项目(41571171; 41171071); 江苏高校优势学科建设工程项目

第一作者: 辛强(1988—), 男(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤湿度遥感反演。E-mail: xinqiang0711@126.com。

通讯作者: 李兆富(1977—), 男(汉族), 山东省新泰市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn。

[Conclusion] As the main land cover types in East China, forest and farmland's trajectory in years of 2003—2010 had a downward trend of soil moisture. With the prolonging of forest growth and cultivation, soil moisture of forest and cropland were increased and decreased, respectively, and reached their maximum and minimum values after 7 years of growth and cultivation, respectively.

Keywords: Eastern China; soil moisture; trajectory analysis

土壤水分是描述地表和大气之间能量、水分交换的关键参数,对于水文、生态以及农林牧业等研究具有重要意义^[1]。微波遥感技术的发展,为区域尺度的土壤水分信息的获取提供了有效手段^[2],极大促进了土壤水分的研究进程。国内外许多学者^[3-4]开始使用遥感手段进行土壤水分的研究。在现有的土壤水分的研究中,关于土壤水分影响因素的研究是极其重要的研究内容。

综合现有的国内外研究,土壤水分的主要影响因素可以分为 2 个方面:自然因素以及人为因素^[5]。自然因素主要包括降水、土壤质地等,其中降水是主要影响因子^[6];人为因素则主要指由于土地覆被变化对土壤水分含量的影响^[7]。自然因素和人为因素相互影响,相互作用,共同决定了土壤水分含量。在大尺度区域内,揭示单一影响因素对土壤水分含量的影响存在较大难度。定量表示单一影响因素对土壤水分影响机理对于有效管理水资源具有重要作用^[8]。目前人为因素,即土地覆被变化对土壤水分影响的研究逐渐得到重视。土地覆被变化会对田间持水量以及水分渗透产生影响^[9],进而影响土壤水分含量。现有的关于土地覆被变化对土壤水分的影响研究大多数集中于不同土地利用类型中土壤水分多样性的相互比较^[10],而对于揭示在土壤水分变化过程中,土地覆被变化影响的研究却比较缺乏。

轨迹分析为描述土地覆被变化提供了很好的手段^[11]。变化轨迹分析方法是用来描述景观格局在时间尺度上发生的变化,也就是对景观变化时间格局的动态刻画。轨迹分析属于一种综合的方法框架,通过栅格叠加计算将不同节点的栅格状态记录在一个新的变化轨迹图谱中,利用相关统计方法,对变化轨迹图谱进行空间分析,以期能够描述研究对象的时空动态变化特征^[12],并且利用地理信息系统空间分析功能进行驱动机制研究。该方法并非通过割裂基本变化过程来获取信息规律,因而在最大程度上保障了动态变化过程的完整性^[13]。

目前国内关于土壤水分的研究,大多数选择西部

及西北部干旱以及半干旱地区作为研究区域^[10],而对于华东地区土壤水分的研究比较少见,邴飞龙等^[14]的研究中指出,华东地区土壤水分蒸散量较高,土壤水分变化剧烈。同时,华东地区土地覆被类型多样,变化较为明显,针对华东地区开展土地覆被变化对土壤水分的影响具有重要的实际意义。因此,本研究利用轨迹分析方法描述 2003—2010 年华东地区土地覆被变化,在 AMSR-E 土壤水分降尺度反演结果的基础上,分析土地覆被变化过程对土壤水分的影响,以期能够揭示土地覆被变化对土壤水分的影响机理。

1 研究区与数据

1.1 研究区域

选取华东地区为研究区域,包括山东省、江苏省、安徽省、浙江省、江西省、福建省和上海市,面积为 $7.98 \times 10^5 \text{ km}^2$,经纬度范围 $24^\circ 27' 36'' - 38^\circ 14' 24'' \text{N}$, $113^\circ 32' 24'' - 122^\circ 42' 36'' \text{E}$ 。研究区内土地覆被类型为:耕地、林地、草地、水体以及其他用地类型。其中,耕地主要分布在山东、江苏、安徽以及浙江省北部,林地主要位于江西、福建以及浙江省南部区域。地势的总体特点是南北高、中部低,根据地形地貌特点大致可分为 3 部分:北部为黄淮平原,中部为长江中下游平原,南部为低山丘陵地区,最大高程为 2 018 m,地形地貌差异显著,土壤水分含量差异较大。本研究区还属于经济发达地区,人为活动影响剧烈,土地利用变化显著,对于区域土壤水分含量具有重要影响。

1.2 研究数据

1.2.1 AMSR-E 土壤水分降尺度反演数据 研究区土壤水分数据选择的是基于 AMSR-E 三级地表土壤水分产品的降尺度结果(图 1)。AMSR-E 土壤水分数据是目前使用较为广泛的微波遥感数据^[15],空间分辨率为 25 km,难以满足研究精度需要。本研究使用的是经过降尺度后的土壤水分反演结果,降尺度原理是基于曹永攀等^[1]提出的利用温度植被干旱指数 TVDI 与土壤水分之间的负相关关系,将 AMSR-E 土壤水分数据空间分辨率提高至 1 km。

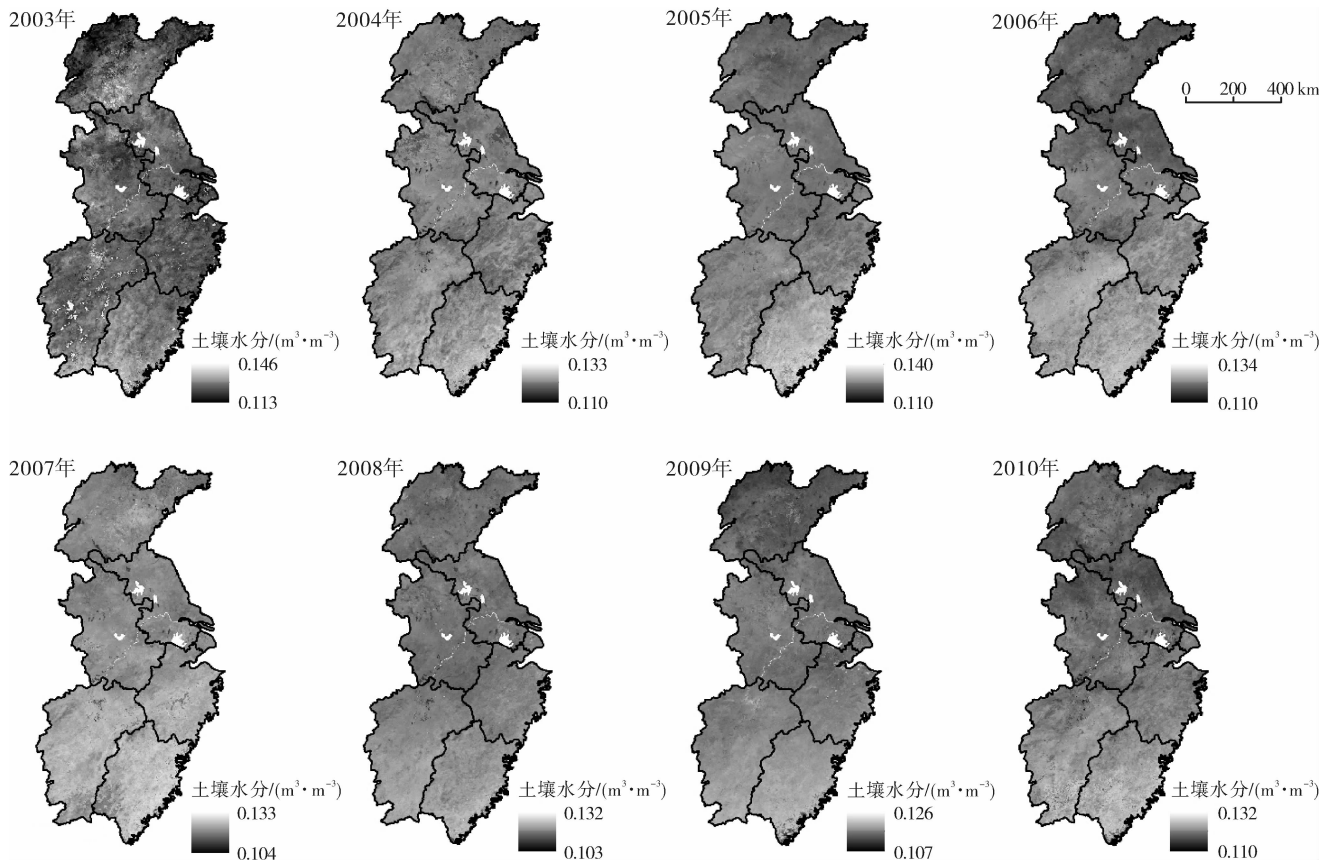


图 1 华东地区 2003—2010 年土壤水分降尺度结果

利用气象数据共享网提供的地面实测土壤水分数据对降尺度后的土壤湿度反演结果进行验证,并选取以下几个参数:绝对系数 R^2 , 相对误差 REVR, 绝对误差 ABVR, 均方根误差 RMSE 以及最大偏差 $\max E$ 和最小偏差 $\min E$ 定义地面土壤水分为 X , 降尺度反演结果为 X_0 , N 是参与比较的样本数, 此处即地面土壤水分测量数目, 计算公式定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_0)^2} \quad (1)$$

$$\text{ABVR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}(X_i - X_0) \quad (2)$$

$$\text{REVR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}\left(\frac{X_i - X_0}{X_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\max E = \max(X - X_0) \quad (4)$$

$$\min E = \min(X - X_0) \quad (5)$$

验证结果如表 1 所示。土壤水分反演结果与地面实测土壤水分数据之间的验证结果证明:降尺度土壤水分结果具有较高的精度,线性回归拟合决定系数 R^2 均在 0.8 以上, 并且 REVR, ABVR, RMSE, $\max E$, $\min E$ 均在误差允许的范围, 表明降尺度土壤水分结果与地面土壤水分数据具有较好的线性相关性, 降尺度结果能够描述土壤湿度的变化情况。

表 1 年际尺度下土壤水分降尺度结果误差分析

年份	N	R^2	REVR	ABVR	RMSE	$\max E$	$\min E$
2003	67	0.82	0.68	0.069	0.071	0.019	0.009
2004	74	0.71	0.64	0.067	0.073	0.022	0.013
2005	79	0.79	0.72	0.071	0.067	0.025	0.015
2006	69	0.8	0.74	0.075	0.077	0.024	0.007
2007	81	0.83	0.73	0.074	0.076	0.021	0.011
2008	83	0.85	0.76	0.073	0.083	0.019	0.014
2009	89	0.81	0.69	0.072	0.079	0.02	0.012
2010	85	0.76	0.65	0.068	0.072	0.022	0.017

注: N 为样本数, R^2 绝对系数, REVR 为相对误差, ABVR 为绝对误差, RMSE 为均方根误差, $\max E$ 为最大偏差, $\min E$ 为最小偏差。

1.2.2 MODIS 数据 选用 MODIS 三级土地覆被类型产品 MCD₁₂Q₁ 来描述华东地区土地覆被类型并计算土地覆被类型轨迹变化。由于 MCD₁₂Q₁ 土地覆被类型产品是经过验证的三级产品,轨迹分析则是基于 MCD₁₂Q₁ 进行的栅格运算,因此能够保证后续轨

迹变化的精确性。结合 MCD₁₂Q₁ 的 IGBP 分类体系,参考中国科学院“国家资源年卫星遥感宏观调查与动态研究”制定的土地资源分类系统^[5,16],将其一级类定义为本研究的分类体系,即:林地、耕地、草地、水体、建设用地以及其他用地类型(表 2)。

表 2 研究区土地利用分类体系

合并后分类体系	MCD ₁₂ Q ₁ IGBP 分类体系	合并后分类体系	MCD ₁₂ Q ₁ IGBP 分类体系
耕地	农田	林地	常绿针叶林
	农田/自然植被拼接		常绿阔叶林
草地	密闭灌丛		落叶针叶林
	稀疏灌丛		落叶阔叶林
	木本热带草原		混交林
	热带草原		水体
	草地	永久湿地	
建筑用地	城市 and 建筑用地	其他用地类型	雪和冰
			稀疏植被

2 研究方法

土地覆被变化轨迹的含义是指对于给定的像元,研究它在一定的时间内所发生的所有的土地利用/覆被类型的转变过程^[17]。根据土地覆被相互转化可以将研究区域划分为不同组分,这种方法为表述不同土地覆被之间的变化提供了有效的手段^[18]。当研究区土地利用类别数小于 10 时,利用栅格运算描述栅格的轨迹变化^[19]:

$$T_{ij} = (G_1)_{ij} \times 10^{n-1} + (G_2)_{ij} \times 10^{n-2} + \dots + (G_n)_{ij} \times 10^{n-n} \quad (6)$$

式中: T_{ij} ——土地覆被变化轨迹分析结果中第 i 行、第 j 列栅格的代码值,代表土地利用变化过程,没有实际的数学意义; n ——时间节点个数; $(G_1)_{ij}$, $(G_2)_{ij}$, ..., $(G_n)_{ij}$ ——时间节点的栅格图像上相应栅格土地利用类型代码值,在本研究中即 2003—2010 年每年的 MCD₁₂Q₁ 栅格影像。每种土地覆被类型均有 3 种轨迹变化过程:研究年限内面积增加的轨迹变化、面积减少的轨迹变化、研究年限内未发生面积变化的轨迹。

由于土地覆被变化导致的土壤水分变化量可以由以下公式计算^[9]:

$$\Delta SSM_{LC} = SSM_{LC} - SSM_{\text{permanent}} \quad (7)$$

式中: ΔSSM_{LC} ——由于土地覆被变化造成的土壤水分的变化量; SSM_{LC} ——在某种土地覆被类型变化轨迹过程中的土壤水分含量; $SSM_{\text{permanent}}$ ——在研究年间没有发生轨迹变化的某种土地覆被类型下的土壤水分含量。以耕地为例, ΔSSM_{LC} ——在 2003—2010 年在耕地的 3 种轨迹变化过程,即:耕地

面积增加,耕地面积减少和未发生变化的耕地 3 种过程中土壤水分含量与耕地面积未发生变化下的土壤水分含量的差值,该差值也就是由于耕地类型的变化带来的土壤水分含量的变化。

3 结果与讨论

3.1 华东地区土地覆被类型变化

在对 MODIS MCD₁₂Q₁ 土地覆被类型产品进行重分类的基础上,统计了 2003—2010 年华东地区 6 种土地利用类型的面积比例(图 2)。

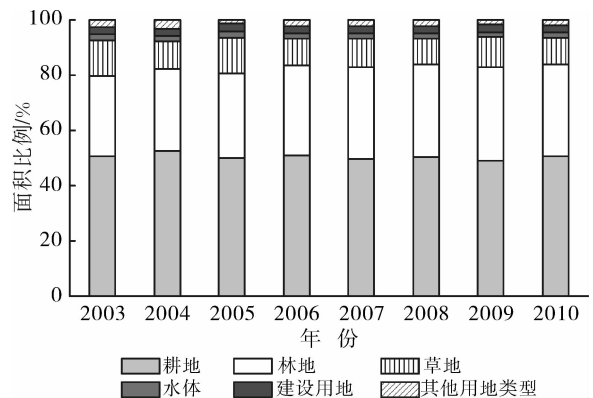


图 2 华东地区 2003—2010 年土地覆被类型面积比例

由图 2 可以看出,耕地为华东地区主要土地利用类型,主要分布在山东、江苏、安徽以及上海等地,研究年限内耕地面积呈现出增长的趋势,面积比例由最初的 50.53% 增长至 2010 年的 50.77%,耕地面积最小值为 2009 年的 49.18%,最大值为 2004 年的 52.50%,面积变化最大值为 8 300 km²。

林地是华东地区第 2 大用地类型,主要分布在浙

江、福建、江西等地,面积比例也呈现出增长趋势,由 2003 年的 29.14% 增长至 2010 年 33.18%,2008 年林地面积最大,所占比例为 33.66%,最小值出现在 2003 年,研究年限内林地面积变化最大量为 11 300 km²。

其他用地类型,如草地、水体、建设用地等都存在不同程度面积变化。

3.2 华东地区土地覆被类型轨迹变化

通过轨迹变化计算公式得到 2003—2010 年 6 种土地覆被类型的轨迹变化,同时结合华东地区土地覆被类型的状况,统计了在 2003—2010 年耕地和林地的轨迹变化过程,分别包括 3 种类型:耕地/林地面积增加;耕地/林地面积退化;耕地/林地未发生变化(表 3—4)。

表 3 华东地区耕地轨迹变化

耕地面积减少				耕地面积增加			
ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%	ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%
1	66666644	耕-耕-耕-耕-耕-草-草	0.253	1	46666666	草-耕-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.511
2	66666664	耕-耕-耕-耕-耕-耕-草	0.248	2	44666666	草-草-耕-耕-耕-耕-耕	0.184
3	66666444	耕-耕-耕-耕-草-草-草	0.168	3	44466666	草-草-草-耕-耕-耕-耕	0.116
4	66664444	耕-耕-耕-耕-草-草-草	0.129	4	44444666	草-草-草-草-草-耕-耕	0.104
5	66444444	耕-耕-草-草-草-草-草	0.117	5	44444466	草-草-草-草-草-耕-耕	0.092
6	66644444	耕-耕-耕-草-草-草-草	0.099	6	44444446	草-草-草-草-草-草-耕	0.091
7	63333333	耕-林-林-林-林-林-林	0.071	7	44446666	草-草-草-草-耕-耕-耕	0.077
8	64444444	耕-草-草-草-草-草-草	0.07	8	36666666	林-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.047
9	66666633	耕-耕-耕-耕-耕-林-林	0.067	9	33333366	林-林-林-林-林-耕-耕	0.024
10	66333333	耕-耕-林-林-林-林-林	0.056	10	33366666	林-林-林-耕-耕-耕-耕	0.022
11	66666333	耕-耕-耕-耕-耕-林-林	0.055	11	44444436	草-草-草-草-草-林-耕	0.022
12	66666663	耕-耕-耕-耕-耕-耕-林	0.047	12	22666666	其-其-耕-耕-耕-耕-耕	0.019
13	66663333	耕-耕-耕-耕-林-林-林	0.033	13	22266666	其-其-其-耕-耕-耕-耕	0.015
14	66633333	耕-耕-耕-林-林-林-林	0.03	14	33666666	林-林-耕-耕-耕-耕-耕	0.015
15	66666634	耕-耕-耕-耕-耕-林-草	0.028	15	33333666	林-林-林-林-林-耕-耕	0.015
16	66666622	耕-耕-耕-耕-耕-其-其	0.019	16	33336666	林-林-林-林-耕-耕-耕	0.013
17	66666222	耕-耕-耕-耕-其-其-其	0.018	17	26666666	其-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.012
18	66444333	耕-耕-草-草-草-林-林	0.017	18	44433366	草-草-草-林-林-林-耕	0.011

注:耕:耕地;林:林地;草:草地;其:其他用地类型。

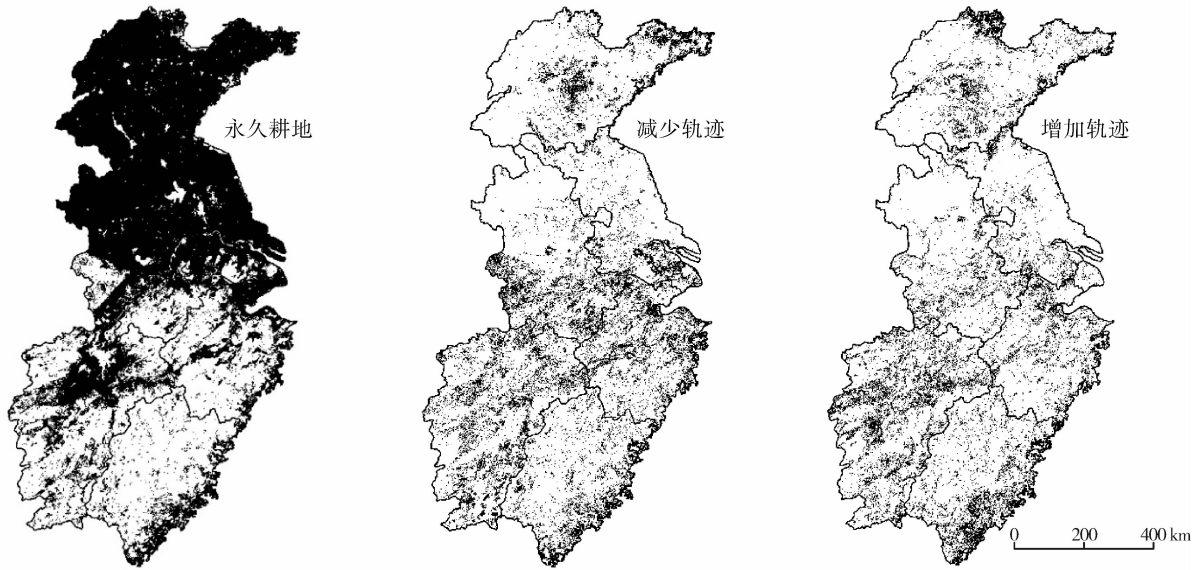
表 4 华东地区林地轨迹变化

林地面积减少				林地面积增加			
ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%	ID	轨迹代码	变化类型	面积比例/%
1	33333344	林-林-林-林-林-草-草	0.161	1	43333333	草-林-林-林-林-林-林	0.621
2	33333334	林-林-林-林-林-林-草	0.146	2	44433333	草-草-草-林-林-林-林	0.448
3	34444444	林-草-草-草-草-草-草	0.106	3	44333333	草-草-林-林-林-林-林	0.295
4	33333444	林-林-林-林-林-草-草	0.095	4	22333333	其-其-林-林-林-林-林	0.254
5	33444444	林-林-草-草-草-草-草	0.090	5	44444333	草-草-草-草-林-林-林	0.200
6	33344444	林-林-林-草-草-草-草	0.072	6	44443333	草-草-草-草-林-林-林	0.195
7	33334444	林-林-林-林-草-草-草	0.052	7	44444433	草-草-草-草-草-林-林	0.152
8	36666666	林-耕-耕-耕-耕-耕-耕	0.047	8	23333333	其-林-林-林-林-林-林	0.132
9	33333336	林-林-林-林-林-林-耕	0.024	9	44444443	草-草-草-草-草-草-林	0.121
10	33333366	林-林-林-林-林-耕-耕	0.024	10	63333333	耕-林-林-林-林-林-林	0.071
11	33366666	林-林-林-耕-耕-耕-耕	0.022	11	66666633	耕-耕-耕-耕-耕-林-林	0.067
12	33333322	林-林-林-林-林-其-其	0.019	12	66333333	耕-耕-林-林-林-林-林	0.056
13	36664444	林-耕-耕-耕-草-草-草	0.017	13	66666333	耕-耕-耕-耕-林-林-林	0.055
14	33333332	林-林-林-林-林-林-其	0.016	14	42333333	草-其-林-林-林-林-林	0.050
15	33666666	林-林-耕-耕-耕-耕-耕	0.015	15	66666663	耕-耕-耕-耕-耕-耕-林	0.047
16	33333666	林-林-林-林-林-耕-耕	0.015	16	66663333	耕-耕-耕-耕-林-林-林	0.033
17	36444444	林-耕-草-草-草-草-草	0.014	17	66633333	耕-耕-耕-林-林-林-林	0.030
18	33336666	林-林-林-林-耕-耕-耕	0.013	18	22233333	其-其-其-林-林-林-林	0.027

在研究年限内,未发生变化的耕地(轨迹代码为 66 666 666)面积为 332 906.5 km²,未发生变化的林地(轨迹代码为 33 333 333)面积为 178 052.75 km²,分别占据研究区面积的 42.12%和 22.53%。在耕地面积减少的轨迹变化过程中,耕地转化为草地、林地以及其他用地类型的比例分别为 28.57%,64.29%和 7.14%,在耕地面积增加的轨迹变化过程中,由草地、林地、其他用地类型转化为耕地的比例为 50%,33.33%,16.67%。而林地面积减少的轨迹变化过程中,林地转化为草地、耕地和其他用地类型的比例为 50%,38.89%和 11.11%,在林地面积增加的轨迹变化过程中,由草地、耕地、其他用地类型转化为耕地的比例分别为 38.36%,43.18%,18.18%。

图 3—4 表示了华东地区耕地和林地的轨迹变化的空间分布。

由图 3—4 分析可知,在研究年限内研究区未发生转化的耕地轨迹主要分布在山东、安徽、江苏以及江西省北部部分地区;耕地面积减少和增加的轨迹空间分布较为分散,主要位于江西、浙江、福建省等部分地区,此外江苏、江西以及山东省等小部分区域也分布有耕地变化的轨迹。研究区林地面积未发生变化的轨迹主要分布于浙江、福建、江西省大部分区域以及安徽省南部地区;林地面积减少的轨迹零散分布于浙江、福建、江西以及安徽省部分地区,林地面积增加的轨迹则集中分布在浙江、福建、江西以及安徽省南部等区域。



注:各图深色区域即为永久耕地、耕地面积减少轨迹和耕地面积增加轨迹。下同。

图 3 华东地区耕地轨迹变化过程空间分布

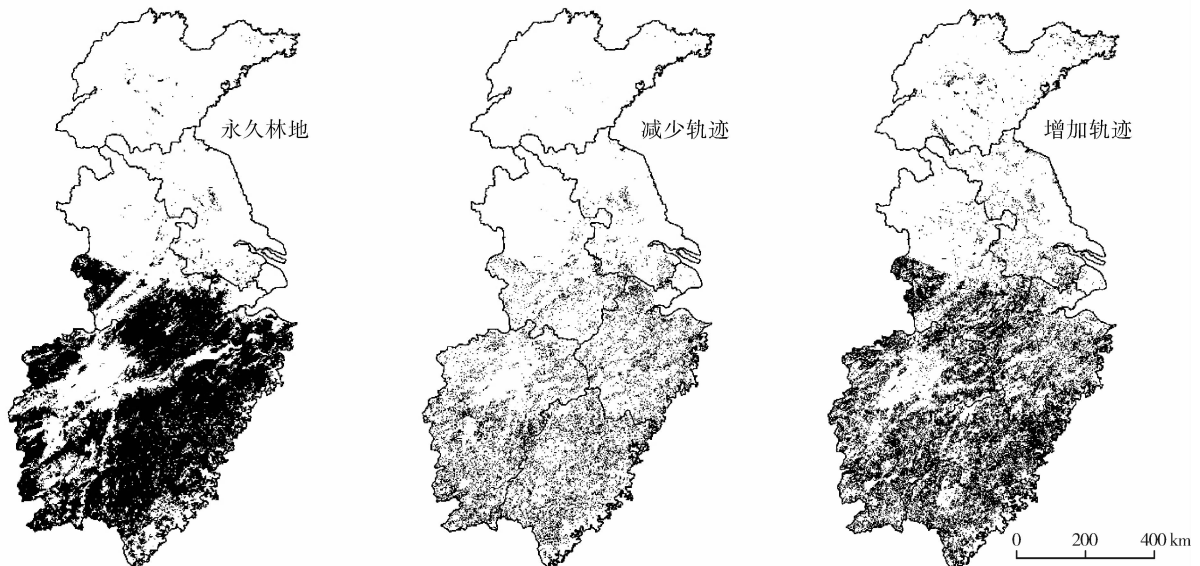


图 4 华东地区林地轨迹变化过程空间分布

3.3 土地覆被变化对土壤水分的影响

提取研究年限内由于耕地和林地的轨迹变化而造成的土壤水分含量的变化情况(图 5—6)。在耕地和林地的轨迹变化过程中,土壤水分与降水量表现出相同的变化趋势。在林地的轨迹变化过程中,未发生轨迹变化的林地土壤水分含量最高,其次是林地面积增加过程,林地面积减少的过程土壤水分含量最少。此外,在林地的 3 种轨迹变化过程中,土壤水分表现出相同的变化趋势,但是 3 种轨迹的土壤水分变化率是不同的。在未发生轨迹变化的林地中,土壤水分变化率为 4.11%,其次是林地增加的过程,变化率为 5.79%,变化率最大的是林地面积减少的过程,土壤水分的变化率为 6.15%,不同的土壤水分变化率表明林地能够减少土壤水分的流失,林地退化则增加了土壤水分的流失量。在耕地的轨迹变化过程中,耕地的土壤水分含量低于林地,在耕地的 3 种轨迹变化形态中,土壤水分均表现出相似的变化趋势,土壤水分含量最高的是耕地面积减少的过程,含量最低的是未发生轨迹变化的耕地,这是由于耕地保持土壤水分能力较弱,在耕地面积减少的过程,尤其是在耕地转化为林地的过程中,增强了保持土壤水分的能力,因此在耕地面积增加的轨迹变化过程中有较高的土壤水分含量。

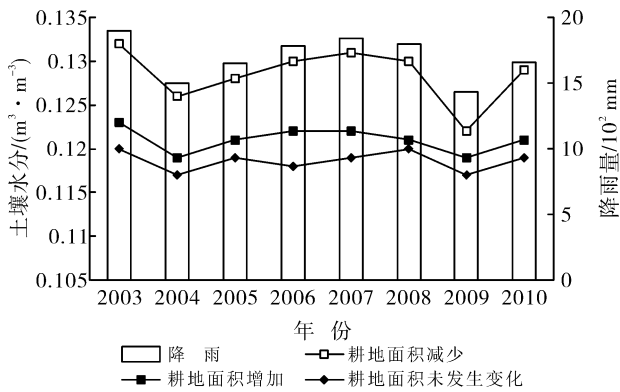


图 5 华东地区耕地轨迹变化中土壤水分变化统计

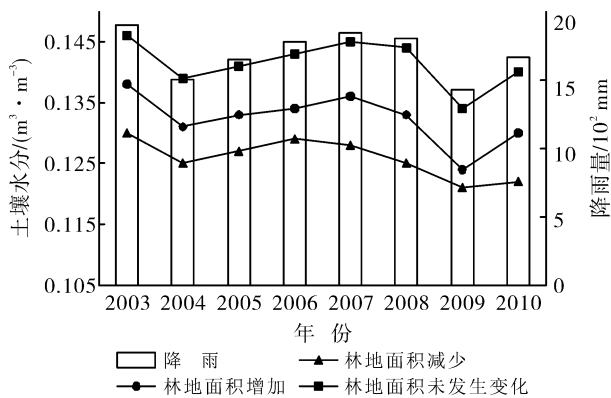


图 6 华东地区林地轨迹变化中土壤水分变化统计

在林地的轨迹变化过程中,永久林地土壤水分含量最高,而且在林地增加的过程中土壤水分含量也低于永久林地中的水分含量,这主要归因于育林年限时间长短^[20]。基于此,根据土地覆被类型的轨迹变化,分别将耕地和林地面积增加的轨迹变化类型变化分为 7 组,例如:轨迹变化类型“*****-林”表示育林年限为 1 a,“*****-林-林”表示育林年限为 2 a,耕地类型同样如此:“*****-耕”表示耕种年限为 1 a,“*****-耕-耕”表示耕种年限为 2 a,提取耕地和林地不同年限下的土壤水分含量(图 7)。在耕种年限内,耕地的土壤水分含量由 0.13 m³/m³ 减少至 0.112 m³/m³,在育林年限内,林地的土壤水分含量由 0.125 m³/m³ 增加至 0.142 m³/m³。在林地增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量逐年增加,但其最大值仍然低于永久林地中的土壤水分,表明林地增加能够提高保持土壤水分的能力,但是这种能力与育林年限紧密相关,至少需要 7 a 时间才可以达到其最大蓄水能力。在耕地面积增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量逐年减少,在第 7 a 达到土壤水分含量最小值,此时土壤水分含量仍然高于未发生轨迹变化的耕地中土壤水分含量,这表明耕地保持土壤水分能力较弱,在耕地面积增加的过程中,减少了土壤水分含量,这种变化过程与耕种年限有关,耕种年限越长,土壤水分含量越低。

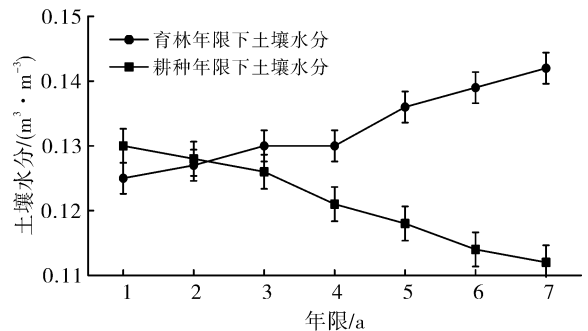


图 7 不同育林/耕种年限下土壤水分含量

以未发生轨迹变化的林地来说,其土壤水分含量的变化是由多种因素共同作用的结果,但是在同种土地利用类型不同轨迹变化过程中,土壤水分含量的变化则可以归因于土地覆被变化的影响^[5]。在林地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分变化率为 13.6%;耕地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分变化率为 13.85%。总体来说,林地具有很好的保持土壤水分的能力,在林地面积增加和林地面积减少的轨迹变化过程中土壤水分含量均低于永久林地。耕地本身对于保持土壤水分的能力较弱,因此其土壤水分含量低

于林地,而且在耕地面积增加的轨迹过程中,土壤水分逐渐减少。在耕地和林地的轨迹变化过程中,土壤水分的变化均与年限长短有关,随着育林年限增长,林地保持土壤水分能力逐渐增强,土壤水分含量逐年升高(图 7);而耕地则恰恰相反,随着耕种年限的增长,土壤水分含量呈现出逐渐下降的趋势(图 7)。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 华东地区土地覆被类型以耕地和林地为主,土地覆被类型变化显著。在 2003—2010 年,耕地面积比例由 50.53% 增长至 50.77%,面积变化最大值为 8 300;林地面积呈增长趋势,面积变化最大量为 11 300。

(2) 2003—2010 年耕地和林地轨迹变化过程显著,主要包括 3 种形式:耕地/林地面积增加,耕地/林地面积减少,耕地/林地面积未发生变化。在耕地面积减少的轨迹变化过程中,以耕地转化为林地所占比例为 64.29%;在耕地面积增加的轨迹过程中,由林地转化而来的耕地所占比例为 33.33%。在林地面积减少的轨迹变化过程中,林地转化为耕地的比例为 38.89%,在林地面积增加的轨迹变化过程中,由耕地转化而来的林地所占比例为 43.18%。

(3) 在所有的轨迹变化过程中,土壤水分均呈现出下降趋势。在林地的 3 种轨迹变化过程中,土壤水分含量最高的是林地面积未发生变化的轨迹过程,林地面积减少的过程土壤水分含量最少,这表明林地在保持土壤水分方面的作用。在耕地 3 种轨迹变化过程中,耕地面积减少过程土壤水分含量最高,耕地面积未发生变化的轨迹变化过程土壤水分含量最低。

(4) 在林地面积增加的轨迹变化过程中,土壤水分含量由 $0.125 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 增长至 $0.142 \text{ m}^3/\text{m}^3$;在耕地面积增加的轨迹变化过程,土壤水分含量由 $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 减少至 $0.112 \text{ m}^3/\text{m}^3$,该变化过程与时间年限有关,随着育林年限增长,其保持土壤水分能力逐渐增强,土壤水分含量逐年升高,至少需要 7 a 时间可以达到其最大蓄水能力。耕地保持土壤水分能力随着耕种年限增长呈下降趋势,在第 7 a 达到土壤水分含量最小值。

4.2 展望

将轨迹分析方法和土壤水分结合起来,描述土地覆被变化对土壤水分的影响,该方法所需参数较少,在计算轨迹变化的过程中所需数据均为 MODIS 产品数据,数据获取快捷方便,并且处理较为简单,是一种简便又不失其物理意义的好方法。但综合来说,还

是存在一定的不足之处,即:在计算轨迹变化时,是在 MODIS MCD₁₂Q₁ 分类体系的基础上进行重新分类。而华东地区地形地貌形态多样,不同地形地貌对不同地表覆盖类型下土壤水分的敏感性差别更大,如果将华东地区不同地形地貌和轨迹分析结合起来,探讨不同地形地貌下土地覆被类型变化对土壤水分的影响,会具有更加现实的意义。但是由于华东地区地形多样,在对华东地区地形地貌分类的过程中结合土地覆被类型变化的过程存在较大难度。在今后的研究中可以开展这方面的工作,考虑研究不同地形地貌类型下的土地覆被轨迹变化,从而说明不同地形地貌下的土地覆被变化过程对土壤水分的影响。

致谢: National Snow and Ice Data Center 提供了 AMSR-E 土壤水分数据,美国宇航局提供了土地覆被类型数据 MCD₁₂Q₁,中国气象科学数据共享服务网提供了地面土壤水分测量数据,谨此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 曹永攀,晋锐,韩旭军,等. 基于 MODIS 和 AMSR-E 遥感数据的土壤水分降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2011,26(5):590-597.
- [2] Durso G, Minacapilli M. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness [J]. Journal of Hydrology, 2006,321(1/4):297-310.
- [3] Notarnicola C, Ventura B, Pasolli L, et al. Towards an operational daily soil moisture index derived from combination of MODIS, ASAR and AMSR-E data[C]. Geoscience & Remote Sensing Symposium IEEE International, 2010:816-819.
- [4] Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (12): 3390-3408.
- [5] Feng Huihui, Liu Yuanbo. Trajectory based detection of forest-change impacts on surface soil moisture at a basin scale Poyang Lake Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014,514(3):337-346.
- [6] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 2004,305(5687):1138-1140.
- [7] Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2012,475(6):111-122.
- [8] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its

- relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1):113-134.
- [9] Wang, Shengping, Zhang, Zhiqiang, Mcvicar T R, et al. An event-based approach to understanding the hydrological impacts of different land uses in semi-arid catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416(2): 50-59.
- [10] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4):515-519.
- [11] Beno't M, Lambin E F. Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(3):467-494.
- [12] Wang, Dongchuan, Gong, Jianhua, et al. Comparative analysis of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21(4):241-252.
- [13] Zhou Q, Li Baolin, Kurban A. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(4): 1093-1107.
- [14] 郇龙飞,苏红波,邵全琴,等. 近30年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1):1-13.
- [15] Sridhar V, Jaksa W T A, Fang B, et al. Evaluating Bias-Corrected AMSR-E soil moisture using in situ observations and model estimates[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(3):1712-1717.
- [16] 胡恒智. 基于MODIS的长三角地表温度时空变化研究[D]. 上海:上海师范大学, 2013.
- [17] Lambin E F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions [J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(3):375-393.
- [18] Feng Huihui, Liu Huiping, Wu Lichun. Monitoring the relationship between the land surface temperature change and urban growth in Beijing, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(10):4010-4019.
- [19] Wang Dongchuan, Gong Jianhua, Chen Liding, et al. Spatio-temporal pattern analysis of land use/cover change trajectories in Xihe watershed [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1):12-21.
- [20] Bauhus J, Pare D, Cote L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8/9):1077-1089.

(上接第30页)

[参 考 文 献]

- [1] 梁宏温,杨健基,温远光,等. 桉树造林再造林群落植物多样性的变化[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(5):40-43.
- [2] 黄承标,刘运华,秦武明,等. 3种植被恢复过程中水土流失规律的研究[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2010, 34(2):59-63.
- [3] 王会利,杨开太,黄开勇,等. 广林巨尾桉人工林土壤侵蚀和养分流失研究[J]. *西部林业科学*, 2012, 41(4): 84-87.
- [4] 郭晋川,梁宏温,潘伟,等. 两种森林集水区径流量及其径流过程初步分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 55-59.
- [5] 阳永泉,温远光,何斌,等. 巨尾桉和厚荚相思人工林土壤肥力及其差异[J]. *林业科技开发*, 2010, 24(2):31-33.
- [6] 杜阿朋,韦东艳,张婧,等. 不同造林措施对桉树人工林地土壤养分的影响[J]. *桉树科技*, 2012, 29(2):1-7.
- [7] 赵一鹤,杨时宇,周祥,等. 巨尾桉工业原料林地与不同土地利用类型坡面产流产沙特征对比分析[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1):77-81, 88.
- [8] 覃其云,曹继钊,梁燕芳,等. 桉树人工林水土流失及养分损耗研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(4): 1566-1568, 1578.
- [9] 黄承标,杨瑶青,温远光,等. 不同更新方式巨尾桉人工林的水土流失规律[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1):43-46, 52.
- [10] 梁宏温,钟瀚涛,温远光,等. 不同造林抚育措施对桉树人工林坡面径流特征的影响[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(11):2020-2025.
- [11] 中华人民共和国国家标准:地表水环境质量标准(GB3838-2002) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:13-26.
- [12] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社, 1999:7-39.
- [13] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1979:28-31.
- [14] 杨凤根,赵燕容,郭晋川,等. 广西速生桉树植区水库水化学特征及其氮来源研究[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(10):6-10.