

间伐对黄龙山辽东栎林下枯落物持水性的影响

曹旭平¹, 于世川², 张文辉², 刘舒宇²

(1. 陕西省延安桥山林业局, 陕西 黄陵 727300; 2. 西北农林科技大学 陕西省林业综合实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 对黄龙山林区辽东栎林抚育间伐与对照设置试验样地, 研究其林下枯落物持水效应特征, 为该地区森林抚育提供理论依据。[方法] 采用重度(间伐 35%)、中度(间伐 25%)、轻度(间伐 15%)抚育间伐, 通过典型取样法、烘干法、浸泡法等开展研究。[结果] 枯落物总储量大小依次表现为: CK(23.500 ± 0.780) > 轻度(22.950 ± 1.012) > 中度(22.708 ± 0.365) > 重度(20.725 ± 1.041), 只有 CK 与重度有显著性; 枯落物总持水量大小依次表现为: 轻度(9.37) > CK(8.29) > 中度(7.61) > 重度(6.39), 轻度间伐下枯落物总有效拦蓄量最大; 枯落物持水量与浸泡时间呈对数函数变化, R^2 均在 0.93 以上, 具有显著相关性; 枯落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数变化, R^2 均在 0.99 以上, 具有显著相关性。[结论] 综合比较不同间伐强度下枯落物持水性, 轻度间伐下枯落物持水性较好, 可为黄土高原地区森林抚育提供理论依据。

关键词: 枯落物; 持水性; 辽东栎; 间伐

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0247-05

中图分类号: S715.3, S715.7

文献参数: 曹旭平, 于世川, 张文辉, 等. 间伐对黄龙山辽东栎林下枯落物持水性的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 247-251. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.041

Effects of Thinning on Litter's Water Holding Capacity of *Quercus Wutaishanica* Forest Understory in Huanglong Mountain

CAO Xuping¹, YU Shichuan², ZHANG Wenhui², LIU Shuyu²

(1. Qiaoshan Forest Bureau of Yan'an City, Huangling, Shaanxi 727300, China; 2. Key Comprehensive Laboratory of Forestry in Shaanxi Province, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of thinning on the water holding features of forests understory litter were studied to provide theoretical basis for local regional forest tending. [Methods] The experimental had thinning treatments of heavy thinning (thinning 35%), medium thinning (thinning 25%), light thinning (thinning 15%) and the control (no thinning) in *Quercus wutaishanica* forest of Huanglong Mountain in Loess Plateau. Typical sampling method, drying method and soaking method were used to measure water holding traits. [Results] Total litter volumes ranked as: CK(23.500 ± 0.780) > light thinning(22.950 ± 1.012) > medium thinning(22.708 ± 0.365) > heavy thinning(20.725 ± 1.041). Only the difference between CK and heavy thinning was significant; The total water holding capacities ranked as: light thinning(9.37) > CK(8.29) > medium thinning(7.61) > heavy thinning(6.39); the total effective retain capacity of light thinning is maximum. The litter water holding capacity presented a significant logarithmic function with soaking time as independent variable and the R^2 was above 0.93. Meanwhile, water absorption rate had a significant power function with soaking time, their R^2 was above 0.99. [Conclusion] Water holding capacity of light thinning performed the best. This is theoretically important for regional forest tending.

Keywords: litter; water holding capacity; *Quercus wutaishanica*; thinning

收稿日期: 2016-04-25

修回日期: 2016-05-11

资助项目: 陕西省科技创新统筹项目“陕西珍贵用材树种质资源培育关键技术研究”(20150210169); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD22B030204)

第一作者: 曹旭平(1963—), 男(汉族), 陕西省宜川县人, 高级工程师, 主要从事森林生态和森林经营管理研究。E-mail: 2408192165@qq.com。

通讯作者: 张文辉(1954—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林培育、生物多样性保护与利用研究。E-mail: 839951676@qq.com。

枯枝落叶层是森林结构中重要的组成部分,是森林地表的一个重要覆盖面和保护层,还能为林木持续生长提供大部分养分,作为森林生态系统水文循环重要部分,对改善土壤结构、截留降雨、减缓降雨动能保护土壤而减少侵蚀、过滤细小土粒来防止土壤大孔隙堵塞、抑制水分蒸发、减缓地表径流具有重要意义^[1]。目前,国内外对枯落物的研究主要集中在其水文功能^[2-4]、分解^[5-6]、蓄积量^[7-9]、养分归还能力^[10]、分布规律^[11]等方面。而就黄土丘陵区间伐对枯落物持水性能影响方面的研究还鲜见报道。黄土丘陵区植被覆盖率低,水土流失严重,枯落物发挥的水文功能对本地区生态保护、治理具有重要意义,尤其该地区森林已经进行了大面积抚育间伐,而间伐对枯落物持水性能的影响尚不明确。为此,本研究以黄龙山林区辽东栎林枯落物为研究对象,探讨间伐对枯落物水文功能的影响,以期为该地区森林抚育提供借鉴。

1 研究区概况

研究区域选择在陕北黄土高原延安市黄龙山林业局蔡家川林场,地理位置 109°38'49"—110°12'47"E, 35°28'46"—36°02'01"N,海拔 962.6~1 783.5 m,属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带,具有大陆性季风气候特征,雨热同季,四季分明。最大年降水量 831.2 mm,最少年降水量为 337.0 mm,年平均降水量 611.8 mm,相对湿度 60%以上。夏季温暖,降水集中,约占全年降水量的 69%,冬季寒冷,干燥少雨,降水量仅占全年降水量的 2.4%。年平均气温 8.6 °C,最高气温 36.7 °C,最低气温 -22.5 °C,无霜期 126~186 d,年均降水量 611.8 mm,是陕西省黄土高原上森林保存较好的地方。该林区属暖温带落叶阔叶林,以辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)为建群种形成的纯林或者

混交林呈镶嵌性分布,并伴有鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、红麸杨(*Rhus punjabensis*)、漆(*Toxicodendron vernicifluum*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等伴生树种,灌木主要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)、黄刺玫(*Rosa rantbina hugonis*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、杠柳(*Periploca sepium*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)等;草本层主要有大披针藁草(*Carex lanceolata*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、黄精(*Polygonatum sibiricum.*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、败酱(*Patrinia scabiosifolia*)、山罗花(*Melam pyrum roseum*)等^[12-13]。该地区辽东栎为天然次生林,抚育以前,林分表现为纯林多,密度大,生长不良,林分基本郁闭,由于郁闭后竞争作用、自然稀疏,使林分基本维持郁闭度 0.9 左右。

2 研究方法

2.1 样地的设置

对辽东栎林充分踏查,在蔡家川林场 143 林斑阴坡设置辽东栎样地,通过典型取样,共设置 20 m×20 m 样地 12 个,每个间伐强度各设置 3 个样地(表 1)。2004 年底实施采伐作业,以近自然经营理念为指导,实施目标树单株林分作业,原则是间密留匀,留优去劣,使林木分布均匀,林分结构更为合理,林分质量有所提高。以林分的蓄积量作为间伐的标准,通过重度(间伐 35%)、中度(间伐 25%)、轻度(间伐 15%)抚育间伐与对照设置试验样地。为了保留间伐强度不变,每隔 3 a 进行 1 次抚育间伐,2015 年 7 月进行调查,样地基本情况详见表 1。

表 1 研究区辽东栎调查样地基本特征

| 处 理 | 样地号 | 海拔/m | 坡度/(°) | 坡位 | 坡向 | 平均树高/m | 胸径/cm |
|------|-----|-------|--------|----|----|--------|-------|
| 对 照 | 1 | 1 613 | 11 | 上坡 | 阴坡 | 12.4 | 17.5 |
| | 2 | 1 601 | 8 | 中坡 | 阴坡 | 10.7 | 19.6 |
| | 3 | 1 622 | 7 | 上坡 | 阴坡 | 10.8 | 17.7 |
| 轻度间伐 | 1 | 1 576 | 9 | 下坡 | 阴坡 | 12.6 | 20.2 |
| | 2 | 1 573 | 13 | 上坡 | 阴坡 | 13.8 | 17.5 |
| | 3 | 1 564 | 8 | 中坡 | 阴坡 | 12.5 | 17.6 |
| 中度间伐 | 1 | 1 542 | 12 | 中坡 | 阴坡 | 11.7 | 19.4 |
| | 2 | 1 638 | 14 | 上坡 | 阴坡 | 13.1 | 18.9 |
| | 3 | 1 627 | 16 | 中坡 | 阴坡 | 12.5 | 17.6 |
| 重度间伐 | 1 | 1 609 | 18 | 下坡 | 阴坡 | 12.6 | 17.4 |
| | 2 | 1 579 | 14 | 中坡 | 阴坡 | 12.3 | 18.4 |
| | 3 | 1 613 | 17 | 上坡 | 阴坡 | 11.4 | 19.6 |

2.2 枯落物蓄积量测定

在各样地右上、中间和左下选择 3 个具有代表性的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方,测量分解层与未分解层厚度,按分解层和未分解层收集枯落物并称重,结合含水率,计算枯落物总储量。

2.3 枯落物持水性测定

在每块样地的 4 个角与中央选择 5 个 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 小样方,收集枯落物保存原样存放到纸盒,称重,带回实验室在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重。将烘干的枯落物分解层、未分解层分别称重放入 0.1 mm 的土壤筛中,完全浸水,分别在 $0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24\text{ h}$ 取出,在室内风干至无水滴落时用电子秤称其重量,以此来测定其不同时间的持水量和最大持水量(24 h 时的持水量)与吸水速率^[14]。

2.4 枯落物含水率测定

枯落物含水率计算公式^[15]为:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W ——枯落物含水率(%); m_1 ——自然状态下枯落物重量(g); m_0 ——烘干后枯落物干重(g)。

2.5 枯落物有效拦蓄量计算

用最大持水率来估算枯落物层对降雨的拦蓄能力会偏高,因为当降雨量达到 $20 \sim 30\text{ mm}$ 以后,不论枯落物层含水量高低,实际持水率约为最大持水率的 85% ,所以通常采用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量^[8]。枯落物有效拦蓄量计算公式^[8]为:

$$R = (0.85Q_m - W) \cdot Z \quad (2)$$

式中: R ——有效拦蓄量(t/hm^2); Q_m ——最大持水

率(%); W ——初始含水量(%); Z ——枯落物蓄积量(t/hm^2)。

3 结果与分析

3.1 不同间伐强度下枯落物蓄积量比较

由表 2 可以看出,不同间伐强度下枯落物未分解层厚度大小依次为:CK(2.25 ± 0.289) > 轻度(2.15 ± 0.155) > 重度(1.875 ± 0.125) > 中度(1.625 ± 0.239),其中只有中度过伐与对照有显著性;分解层大小依次为:中度(3.275 ± 0.25) > CK(3.25 ± 0.144) > 轻度(2.375 ± 0.125) > 重度(1.925 ± 0.175),其中轻度、重度间伐与对照、中度过伐均有显著性,轻度与重度、对照与中度之间无显著性;枯落物总厚度大小依次表现为:CK(5.500 ± 0.204) > 中度(4.900 ± 0.245) > 轻度(4.525 ± 0.165) > 重度(3.8 ± 0.238),其中轻度、重度与对照均有显著性,中度与对照无显著性,重度与轻度、中度均有显著性,轻度与中度无显著性。

研究区枯落物未分解层储量大小依次为:轻度(6.05 ± 0.399) > CK(5.49 ± 0.321) > 重度(5.375 ± 0.511) > 中度(3.958 ± 0.275),只有中度与对照、轻度、重度有显著性;枯落物分解层储量大小依次为:中度(19.083 ± 0.578) > CK(16.942 ± 0.479) > 轻度(16.900 ± 0.725) > 重度(15.350 ± 0.766),只有中度与对照、轻度、重度有显著性;枯落物总储量大小依次为:CK(23.500 ± 0.780) > 轻度(22.950 ± 1.012) > 中度(22.708 ± 0.365) > 重度(20.725 ± 1.041),只有 CK 与重度存在显著性相关。

表 2 研究区不同间伐强度下枯落物蓄积量

| 间伐强度 | 未分解层 | | | 分解层 | | | 总厚度/cm | 总储量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) |
|------|------------------------|--|------------|---------------------|--|------------|------------------------|---|
| | 厚度/cm | 储量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 储量 比例/% | 厚度/cm | 储量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 储量 比例/% | | |
| CK | 2.25 ± 0.289^b | 5.49 ± 0.321^a | 27.91 | 3.25 ± 0.144^b | 16.942 ± 0.479^a | 72.09 | 5.500 ± 0.204^a | 23.500 ± 0.780^a |
| 轻度 | 2.15 ± 0.155^{ab} | 6.05 ± 0.399^a | 26.36 | 2.375 ± 0.125^a | 16.900 ± 0.725^a | 73.64 | 4.525 ± 0.165^b | 22.950 ± 1.012^{ab} |
| 中度 | 1.625 ± 0.239^a | 3.958 ± 0.275^b | 15.96 | 3.275 ± 0.259^b | 19.083 ± 0.578^b | 84.04 | 4.900 ± 0.245^{bc} | 22.708 ± 0.365^{ab} |
| 重度 | 1.875 ± 0.125^{ab} | 5.375 ± 0.511^a | 25.93 | 1.925 ± 0.175^a | 15.350 ± 0.766^a | 74.07 | 3.8 ± 0.238^a | 20.725 ± 1.041^b |

注:表中数值为:测量值±标准差;不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著。

3.2 不同间伐强度下枯落物持水动态

3.2.1 不同间伐强度下枯落物持水量随时间变化规律

由表 3 可知,随着浸泡时间增加,枯落物持水量均表现增加趋势,到 24 h 枯落物持水量达到最大值。枯落物未分解层最大持水量大小依次为:CK(3.10)

> 轻度(2.70) > 重度(1.92) > 中度(1.64);枯落物分解层最大持水量大小依次为:轻度(6.67) > 中度(5.97) > CK(5.19) > 重度(4.47);枯落物总持水量大小依次为:轻度(9.37) > CK(8.29) > 中度(7.61) > 重度(6.39)。

表 3 研究区不同间伐强度下的枯落物持水量

| 间伐强度 | 枯枝落叶层 | 浸水时间/h | | | | | | | | 总持水量 |
|------|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 24 | |
| CK | 未分解层 | 1.50 | 2.03 | 2.25 | 2.53 | 2.59 | 2.73 | 2.87 | 3.10 | 8.29 |
| | 分解层 | 3.67 | 3.97 | 4.36 | 4.46 | 4.60 | 4.79 | 4.99 | 5.19 | |
| 轻度 | 未分解层 | 1.75 | 2.14 | 2.22 | 2.27 | 2.36 | 2.49 | 2.62 | 2.70 | 9.37 |
| | 分解层 | 3.91 | 4.77 | 5.22 | 5.44 | 5.74 | 5.92 | 6.09 | 6.67 | |
| 中度 | 未分解层 | 0.92 | 1.16 | 1.27 | 1.32 | 1.38 | 1.47 | 1.58 | 1.64 | 7.61 |
| | 分解层 | 4.18 | 4.74 | 4.96 | 5.15 | 5.27 | 5.52 | 5.70 | 5.97 | |
| 重度 | 未分解层 | 0.95 | 1.30 | 1.40 | 1.48 | 1.53 | 1.74 | 1.76 | 1.92 | 6.39 |
| | 分解层 | 3.20 | 3.38 | 3.65 | 3.73 | 4.03 | 4.11 | 4.25 | 4.47 | |

3.2.2 枯落物持水量与浸泡时间回归关系 对不同间伐强度下枯落物持水量与浸泡时间的数据进行回归分析发现(图 1), 枯落物未分解层及半分解层持水量(A_h)与浸泡时间(t)之间存在对数函数关系, 由图

1 可知, 不同间伐强度下枯落物未分解层、分解层持水量与浸泡时间表现为显著相关性, R^2 值都在 0.93 以上, 在 8 h 以前各间伐强度下枯落物未分解层、分解层持水量均增加较快, 8 h 以后其增加缓慢。

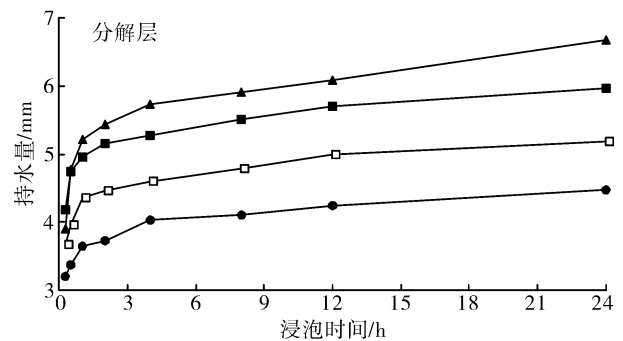
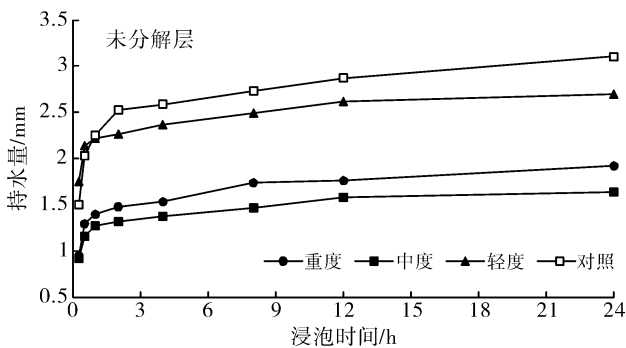


图 1 枯落物未分解层和分解层的持水量变化

3.3 不同间伐强度下枯落物吸水速率与浸泡时间关系

由表 4 可以看出, 随着浸泡时间的增加, 不同间伐强度下枯落物未分解层、分解层吸水速率逐渐减小, 到 24 h 吸水速率已降到 0.28 mm/h 以下。对不同间伐强

度下枯落物吸水速率与浸泡时间的数据进行回归分析拟合发现, 不同间伐强度下枯落物未分解层及半分解层吸水速率(Q_t)与浸泡时间(t)呈幂函数关系, 不同间伐强度下枯落物未分解层、分解层吸水速率与浸水时间表现为显著的相关性, R^2 值都在 0.99 以上(图 2)。

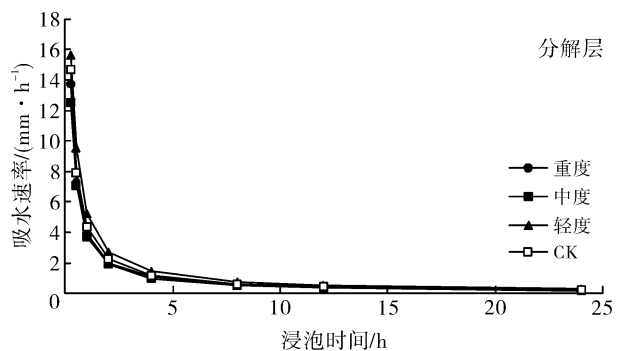
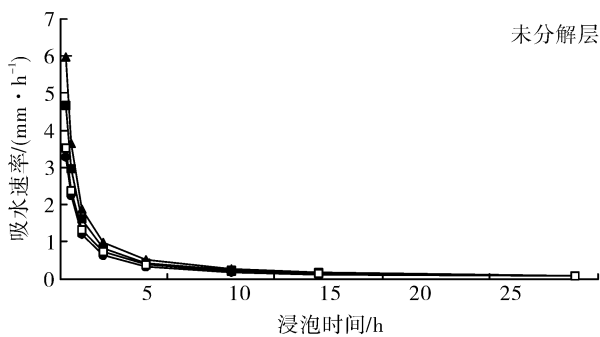


图 2 枯落物未分解层和分解层的吸水速率变化

3.4 不同间伐强度枯落物持水性能

由表 5 可以看出, 轻度间伐下枯落物未分解层自

然含水量、自然含水率最大, 分别为 $7.33 \pm 0.561 \text{ t/hm}^2$ 和 $21.18 \pm 1.945\%$, 最大持水量仅小于

CK,表明轻度间伐利于枯落物未分解层储水;中度间伐下枯落物未分解层自然含水量、自然含水率、最大持水量最小,而枯落物分解层自然含水量最大为 $25.03 \pm 1.783 \text{ t/hm}^2$,自然含水率略小于CK为 $31.15 \pm 2.947\%$,最大持水量仅小于轻度间伐为 $5.97 \pm 0.243 \text{ mm}$,可能因为中度间伐生境利于枯落物分解,导致未分解层浇薄,不利于储水,但分解层较厚,利于储水;枯落物未分解层中最大持水率大小依次表现为:CK($562.57 \pm 28.345\%$)>中度($467.21 \pm 20.384\%$)>轻度($406.20 \pm 14.652\%$)>重度

($379.22 \pm 19.352\%$);最大吸湿比在枯落物未分解层大小依次表现为:轻度(8.45 ± 0.569)>CK(6.77 ± 0.215)>重度(3.93 ± 0.243)>中度(3.71 ± 0.172),表明轻度间伐枯落物未分解层持水能力较强;最大吸湿比在枯落物分解层大小依次表现为:中度(4.53 ± 0.184)>轻度(4.50 ± 0.316)>CK(4.38 ± 0.143)>重度(3.64 ± 0.165),可能因为中度间伐分解层蓄积量较大;轻度间伐下枯落物分解层有效拦蓄量最小,未分解层有效拦蓄量最大,总有效拦蓄量最大,说明轻度间伐枯落物持水能力强。

表4 研究区不同间伐强度下的枯落物吸水速率

| 间伐强度 | 枯落物层 | 浸水时间/h | | | | | | | |
|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 24 |
| CK | 未分解层 | 3.517 | 2.380 | 1.319 | 0.739 | 0.379 | 0.200 | 0.140 | 0.076 |
| | 分解层 | 14.693 | 7.933 | 4.358 | 2.231 | 1.151 | 0.599 | 0.416 | 0.216 |
| 轻度 | 未分解层 | 5.973 | 3.648 | 1.894 | 0.968 | 0.504 | 0.266 | 0.187 | 0.096 |
| | 分解层 | 15.640 | 9.542 | 5.221 | 2.718 | 1.434 | 0.739 | 0.507 | 0.278 |
| 中度 | 未分解层 | 4.677 | 2.953 | 1.617 | 0.839 | 0.438 | 0.234 | 0.167 | 0.087 |
| | 分解层 | 12.507 | 7.085 | 3.705 | 1.925 | 0.985 | 0.515 | 0.355 | 0.186 |
| 重度 | 未分解层 | 3.283 | 2.243 | 1.210 | 0.641 | 0.332 | 0.188 | 0.127 | 0.069 |
| | 分解层 | 13.743 | 7.245 | 3.911 | 2.000 | 1.081 | 0.551 | 0.380 | 0.200 |

表5 研究区不同间伐强度下枯落物持水能力指标

| 间伐强度 | 枯落物层 | 自然含水量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 自然含水率/% | 最大持水量/mm | 最大吸湿比 | 有效拦蓄量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) |
|------|------|---|-------------------|------------------|------------------|---|
| CK | 未分解层 | 6.5 ± 0.265 | 19.27 ± 2.036 | 3.10 ± 0.442 | 6.77 ± 0.215 | 24.67 ± 1.042 |
| | 分解层 | 22.44 ± 0.948 | 32.43 ± 3.124 | 5.19 ± 0.328 | 4.38 ± 0.143 | 33.77 ± 1.924 |
| 轻度 | 未分解层 | 7.33 ± 0.561 | 21.18 ± 1.945 | 2.70 ± 0.154 | 8.45 ± 0.569 | 11.75 ± 0.492 |
| | 分解层 | 22.27 ± 1.251 | 31.78 ± 1.762 | 6.67 ± 0.434 | 4.50 ± 0.316 | 60.05 ± 2.759 |
| 中度 | 未分解层 | 4.42 ± 0.156 | 11.76 ± 0.854 | 1.64 ± 0.325 | 3.71 ± 0.172 | 23.31 ± 1.327 |
| | 分解层 | 25.03 ± 1.783 | 31.15 ± 2.947 | 5.97 ± 0.243 | 4.53 ± 0.184 | 38.03 ± 1.428 |
| 重度 | 未分解层 | 6.13 ± 0.248 | 13.96 ± 1.642 | 1.92 ± 0.143 | 3.93 ± 0.243 | 20.23 ± 1.063 |
| | 分解层 | 19.86 ± 1.283 | 29.41 ± 2.817 | 4.47 ± 0.169 | 3.64 ± 0.165 | 38.45 ± 1.286 |

4 讨论与结论

(1) 间伐使枯落物厚度变薄,蓄积量减少,但间伐增加林内光照,提高地表温度,加速未分解层枯落物分解,导致未分解层储量少,分解层储量大,这在中度、轻度间伐表现的尤为明显;重度间伐林内光照过强,温度过高,不利于枯落物未分解层分解,且由于林木数量少,枯落物储量也很少,与对照表现为显著。

(2) 轻度间伐枯落物各持水性能指标表现为优越,枯落物分解层均大于未分解层持水量。枯落物分解层持水量明显大于未分解层,说明枯落物分解层持水性对林地涵养水源起主要作用,层枯落物持水量与浸

泡时间呈对数函数变化, R^2 均在0.93以上,具有显著相关性,24 h持水量达到最大值,8 h以后持水量变化缓慢;总持水量轻度间伐最大为9.37 mm,自然含水量为 29.6 t/hm^2 ,最大吸湿比为12.95,有效拦蓄量为 71.8 t/hm^2 ,表现较好的持水性,说明轻度间伐可以增加枯落物持水量。

(3) 枯落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数变化, R^2 均在0.99以上,具有显著相关性;轻度间伐吸水速率最快,这与其持水量最大有直接关系,表明轻度间伐加快了枯落物吸水速率,持水性能较好。

(4) 黄土丘陵区水土流失严重,生态环境脆弱,轻度间伐提高枯落物持水性,对保护水土流失有重要意义。

(下转 257 页)

滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素

丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 揭示滇中地区植被 NDVI 时空变化特征及其与气候因子、人类活动的关系, 为该地区的社会经济可持续发展提供科学依据。[方法] 以 MODIS NDVI 数据资料集、标准气象站点的气候数据及社会经济统计数据为素材, 采用叠置分析、空间统计分析和相关分析为主要方法。[结果] (1) 滇中地区植被 5 月上旬进入生长季而 10 月下旬结束, 2001—2010 年植被 NDVI 呈现出上升的趋势, 速率为 0.03/10 a, 植被盖度整体朝增加的方向发展。(2) 2001—2010 年滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%, 减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围, 增加的区域主要集中在高海拔地区。(3) 气候影响因素中的水分类因素即平均相对湿度、最小相对湿度和降水是滇中地区植被 NDVI 年内变化主要的影响因素。(4) 退耕还林工程极大地提升了滇中地区的植被盖度, 而城镇化过程则使得滇中地区城镇周边的极低、低植被覆盖度区面积增加。[结论] 滇中地区年内植被 NDVI 变化由气候因子所控制, 而长期变化则受人类活动的制约。

关键词: 植被 NDVI; 时空变化; 气候因子; 退耕还林; 滇中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0252-06

中图分类号: Q948.11

文献参数: 丁文荣. 滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 252-257. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.042

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Vegetation NDVI and Its Driving Factors in Central Yunnan Province

DING Wenrong

(College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The relationships between NDVI and the impacting variables of climatic factors and human activity in central Yunnan Province were demonstrated to provide scientific basis for the sustainable social and economic development of the Province. [Methods] MODIS NDVI (normal difference vegetation index, NDVI) data sets, climate data from standard meteorological stations and socio-economic statistical source were dealt with overlay method, spatial statistical analysis and correlation analysis to study the characteristics of temporal and spatial variation of vegetation NDVI. [Results] Vegetation growing season in Central Yunnan Province starts from early May and ends around late October. From 2001 On 2010, vegetation NDVI showed a rising trend and a rate of 0.03/10 a. Though vegetation coverage area showed an increasing trend overall, there still existed decreases region for vegetation coverage in Central Yunnan Province. The increased and decreased area covered 70.24% and 29.76% of the total area of central Yunnan Province. The most prominent areas with decreased vegetation NDVI were found mainly around the people-centered cities and towns; and the increased areas were mainly in the high-altitude. The average relative humidity, minimum relative humidity and precipitation were the main factors affecting the annual change of vegetation NDVI. The implementation of returning farm land to forestry played a key role for the enhancement of vegetation coverage in Central Yunnan Province; On the contrary, the process of urbanization led to vegetation degradation. [Conclusion] The short term change of vegetation NDVI in central Yunnan Province, for example, the an-

收稿日期: 2015-10-13

修回日期: 2016-06-06

资助项目: 云南省教育厅重点项目“金沙江下游龙川江流域水沙输移过程及机制研究”(2015Z056); 国家自然科学基金项目(41101099; 41261044)

第一作者: 丁文荣(1979—), 男(彝族), 云南省昆明市人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: dingwenrong@163.com.

nual change was determined by climatic factors; While long-term change was mainly affected by human activities.

Keywords: vegetation NDVI; temporal and spatial variation; climatic factors; returning land for farming to forestry; central Yunnan Province

植被是地理环境的重要组成部分,归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是目前最为常用的表征植被状况的指标,与叶面积指数、土地利用、植被覆盖度、生物量等密切相关。国内外学者对 NDVI 的驱动因子尤其是气候要素与植被 NDVI 之间的关系进行了系统研究,发现气温、降水与植被 NDVI 变化最为密切,它们之间的关系具有显著的空间差异^[1]。国外对植被 NDVI 变化的研究表明,北半球中高纬地区植被活动显著增加,气候变暖导致全球部分地区植被覆盖发生显著变化^[2],这在我国东北、华北、青藏高原等地区的研究中也得到了体现^[3-5]。此外,现有的研究^[6]结果表明,农业生产与植被恢复会导致植被 NDVI 增加,而植被分布及变化与人口密度、单位 GDP 等呈显著负相关。

滇中地区是云南省的政治、经济和文化中心与交通枢纽。2015 年的统计结果表明,该区域人口 1 702.8 万人,占该省总人口的 37.4%;城镇化水平为 40%左右,该区的城镇化决定了云南省城镇化水平的总体进程;GDP 占该省的 57.8%,人均 GDP 约为 19 400 元,是全省人均 GDP 的 1.55 倍,已成为云南省的名副其实经济核心区。近年来,研究者开始关注滇中地区植被覆盖的变化状况,如赵文君等^[7]通过 Modis 1B 数据计算了 2009—2013 年滇中地区 NDVI 月时间序列数据,并利用相关性分析和差值分析定量描述了农田、森林、灌丛和草地 4 种绿色覆盖 NDVI 年内变化曲线在年际时间尺度上的协同性和差异性。王金亮等^[8]利用 1982—2001 年近 20 a 的 AVHRR 8 km 的 NDVI 数据集,研究了云南省的植被指数变化特征,结果表明滇中地区植被有明显的季节差异和空间差异,植被 NDVI 变化幅度介于滇东北和全省植被 NDVI 变化之间。可见,目前针对滇中地区植被的研究已取得了一些有意义的成果,但这些研究成果仍然无法清晰揭示区内植被的演变特征及其主要驱动因素。基于此,本研究以滇中地区 Modis NDVI 植被数据集为基础,对滇中地区近年来植被覆盖的时空特征进行系统分析,探讨滇中地区植被 NDVI 的时空变化规律及驱动因素,及时为滇中地区的社会经济可持续提供科学依据。

1 研究区概况

滇中地区包括昆明市、玉溪市、曲靖市和楚雄彝族自治州 4 个州市,地理位置位于 100° 45'—

104° 48' E 和 23° 20'—27° 02' N 之间,面积约 $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$,占云南省国土面积的 27.92%。地势北高南低,起伏和缓,大部分地区海拔在 1 500~2 800 m 之间,以山地和山间盆地地形为主,集中了云南全省近 1/2 的山间平地(坝子)。多年平均气温 15.1 °C,年日照时数平均为 2 448.7 h,无霜期 227 d,年降雨量 1 035 mm,属典型的亚热带季风气候,干湿季分明。土壤类型以山原红壤为主,北部金沙江一带发育有干旱河谷特有的燥红土。植被类型多样,以次生植被和人工植被。由于滇中地区位于长江、珠江和红河的上游或源区,并有滇池、抚仙湖、星云湖和阳宗海等高原湖泊,水资源保障程度较高,但水质性缺水问题较为严重。

2 数据与方法

本研究所用数据主要包括 Modis NDVI 植被数据、气象数据和社会经济数据等。NDVI 数据为 NASA MODIS 陆地产品组根据统计算法开发的 MODIS 植被指数产品 MOD₁₃ Q₁,其时间跨度为 2001 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日,时间分辨率为 1 日,空间分辨率为 1 000 m,是在已有的植被指数的基础上改进设计的。对所获得的 MOD₁₃ Q₁ 遥感数据集进行子集提取、图像镶嵌、数据格式转换、投影转换及质量检验等预处理后,采用最大值合成 MVC (maximum value composites)法^[9]和均值法对 Modis NDVI 数据进行计算,获得质量可靠的植被 NDVI 旬和年时间尺度数据集。其中,MVC 法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的干扰,计算公式为:

$$\text{NDVI}_{mi} = \max(\text{NDVI}_{ij}) \quad (1)$$

式中: NDVI_{mi} ——第 i 个 10 d 周期的 NDVI 最大值合成值; NDVI_{ij} ——第 i 个 10 d 周期内第 j 天的 NDVI 值。

在统计整个区域的 NDVI 值时,采用均值法进行计算,计算公式为:

$$\text{NDVI}_a = \sum \text{NDVI}_{x,y/n} \quad (2)$$

式中: NDVI_a ——区域的 NDVI 平均值; x ——统计区域像元行数; y ——统计区域内像元列数; n ——统计区域内像元总数。

气象数据为 2001 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日滇中地区内 41 个站点资料(图 1),该数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)和云南省气象局资料中心,经过严格的质

量控制,包括连续性检验、极值检验和时间一致性检验。对收集到气候资料,首先处理为每个站点的旬值数据,然后采用泰森多边形法^[10]将不同站点的气象数据转化为滇中地区的面值气象数据。

社会经济数据主要来源于 2000—2010 年的云南省统计年鉴。

3 滇中地区植被 NDVI 变化特征

3.1 植被 NDVI 时间变化

植被覆盖度可由遥感影像反演的 NDVI 充分反映,与 NDVI 呈正相关,即植被覆盖度愈好,NDVI 值愈大^[11]。统计结果表明,2001—2010 年滇中地区 NDVI 的旬平均值为 0.56。从图 1 可以看出,就逐旬

来看,滇中地区 NDVI 值变化非常明显,呈单峰型,波动于 0.49~0.68 之间,4 月下旬为一年中的最低值 0.49,而 9 月下旬达最高值 0.68。4 月下旬达到最低值后,逐步开始回升,5 月上旬进入生长季后 6 月缓慢上升,7,8 月升速最快,9 月下旬达到峰值,10 月下旬生长季结束后开始下降,并一直持续到翌年 5 月份。从年际来看,最大化年值 NDVI 数据散点图中(图 1),能清晰看出在研究时段内年均植被 NDVI 波动于 0.53~0.59 之间,2001 年 0.53 为最低值,而 2006 年 0.59 则为最高值。2001—2010 年植被 NDVI 呈现出波动上升的趋势,速率为 0.03/10 a,表明滇中地区植被得到恢复,总体来看覆盖度呈现增加的态势。

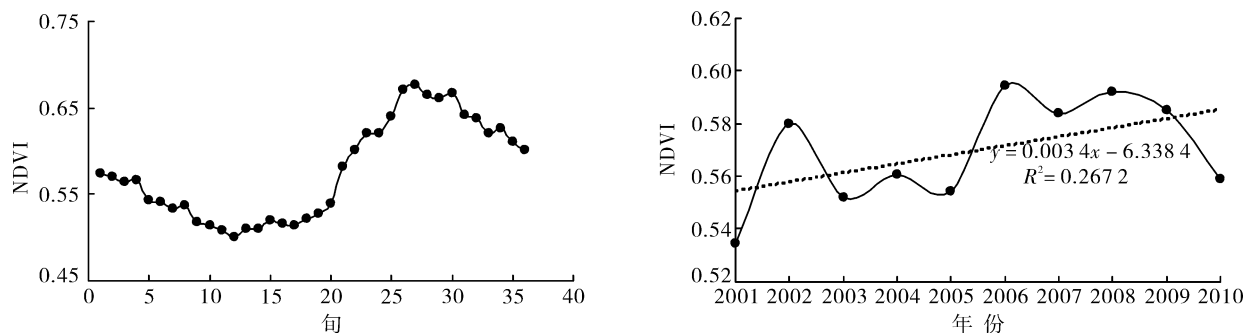


图 1 滇中地区植被 NDVI 年内和年际变化

为探讨滇中地区植被 NDVI 年际变化特征,根据中国水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[12],将滇中地区 NDVI 值划分为 5 级,分级标准为:NDVI < 0.10 时为极低植被覆盖度,0.10 ≤ NDVI < 0.30 时为低植被覆盖度,0.30 ≤ NDVI < 0.50 时为中植被覆盖度,0.50 ≤ NDVI < 0.70 时为中高植被覆盖度和 NDVI ≥ 0.70 时为高植被覆盖度。起止年份 2001 和 2010 年各级别植被 NDVI 变化状况详见表 1。从表 1 可以看出,滇中地区植被覆盖面积最大的分别是中植被覆盖度区和中高植被覆盖度区,2001

年两者分别占滇中地区总面积的 32.62% 和 64.67%,而 2010 年两者则分别占 23.97% 和 70.61%。此外,从表 1 也可以看出,自 2001—2010 年,滇中地区各级别植被 NDVI 变化存在很大差异。除了中植被覆盖度区面积呈现出减少趋势外,其它等级植被覆盖度区面积都呈现出增加的趋势。其中极低植被覆盖度区面积增加了 27.86 km²,低植被覆盖度区面积增加了 174.57 km²,中植被覆盖度区面积增加了 6 526.79 km²,而高植被覆盖度区面积则增加了 2 780.55 km²。

表 1 滇中地区 2001—2010 年 NDVI 变化序列

| 年份 | 极低覆盖度 | | 低覆盖度 | | 中覆盖度 | | 中高覆盖度 | | 高覆盖度 | |
|------|--------|------|--------|------|-----------|-------|-----------|-------|----------|------|
| | 数值 | 比例 | 数值 | 比例 | 数值 | 比例 | 数值 | 比例 | 数值 | 比例 |
| 2001 | 267.42 | 0.24 | 751.66 | 0.68 | 35 879.25 | 32.62 | 71 139.16 | 64.67 | 1 962.49 | 1.78 |
| 2010 | 295.28 | 0.27 | 926.23 | 0.84 | 26 369.49 | 23.97 | 77 665.96 | 70.61 | 4 743.04 | 4.31 |
| 变化 | 27.86 | | 174.57 | | -9 509.77 | | 6 526.79 | | 2 780.55 | |

注:植被覆盖度面积单位为 km²,各占当年滇中地区总面积的比例单位为 %。

3.2 植被 NDVI 空间变化

采用空间叠置分析方法,统计了滇中地区 2001—2010 年的植被 NDVI 变化情况,结果如图 2

所示。从统计结果来看,自 2001—2010 年:NDVI 值减少 0.2 以上的区域为 134.64 km²,约占滇中总面积的 0.12%;NDVI 值减少 0.2~0.1 的区域为

1 022.80 km², 约占滇中面积的 0.93%; 面积减少了 0.1~0.0 的区域为 31 578.20 km², 约占滇中面积的 28.71%; NDVI 值增加 0.0~0.1 的区域为 73 258.58 km², 约占滇中面积的 66.60%; NDVI 值增加 0.1~0.2 的区域为 3 986.27 km², 约占滇中面积的 3.62%; NDVI 值增加 0.2 以上的区域为 19.50 km², 约占滇中面积的 0.02%。整体而言, 滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%。可见, 经过多年持续不断的植被恢复和保护后, 当地的植被覆盖整体上得到了有效提升。从图 2 中还可以看出, 植被 NDVI 减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围, 如环滇池一带的昆明市区、玉溪市首府所在地的红塔区、曲靖市首府所在地的麒麟区和楚雄彝族自治州首府所在地楚雄市的外围。此外, 区内一些重要的经济开发区、基础设施建设区也减少突出, 如嵩明县杨林工业园区、陆良县工业园区和昆明长水国际机场等区域植被 NDVI 均降低突出。再者, 植被 NDVI 有微弱减少的区域还集中在南盘江、元江和普渡河干流沿线一带。此外, 滇中地区植被主要为增加为主, 增加最为显著的区域主要集中在高海拔山区, 如昆明市与曲靖市交界的梁王山一带、玉溪市的哀牢山山区、曲靖市的乌蒙山山区、昆明市与楚雄市交界的三台山山区等。

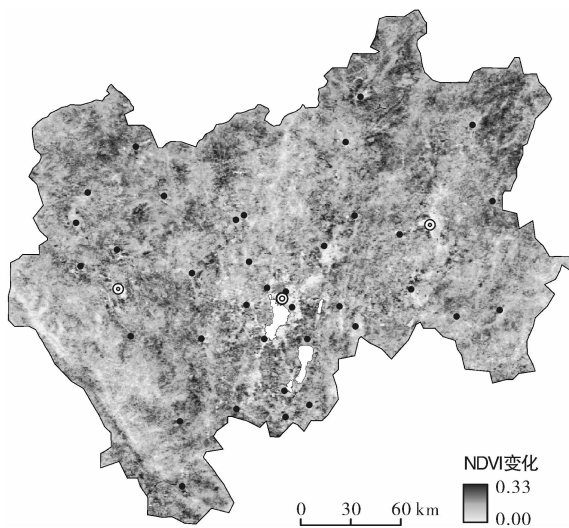


图 2 滇中地区植被 NDVI 空间变化

4 滇中地区植被 NDVI 变化的驱动因素

植被 NDVI 的时空变化影响要素是多方面的, 可以概括为自然方面和人为影响方面。短时间尺度

上自然因素特别是降水与气温变化往往是导致植被 NDVI 变化的主控因子, 长时间尺度上人类活动尤其是土地开发利用影响突出^[13]。故此, 本研究分别从气候要素和人类活动的主要方面展开研究。

4.1 气候因子与植被 NDVI 变化

已有研究^[3]表明, 气候对植被覆盖的影响主要表现为对植被生长期年内韵律的控制方面。本研究采用相关分析法计算了 2001—2010 年滇中地区 NDVI 旬值序列与同旬降水量、平均气温、日照时数、平均风速和平均气压等 10 个气候因子的相关系数(表 2)。结果表明, 滇中地区植被 NDVI 与各气候因子的同期相关性从大到小排序为: 平均相对湿度>最小相对湿度>降水>最高气温>日照时数>平均水汽压>平均气压>平均气温>最低气温和风速。可以看出, 从旬时间尺度来看, 植被 NDVI 是各气候要素综合作用的结果, 但与单个气候要素的相关系数都很小, 均未超过 0.25。植被生长对气候因子的响应存在一定的滞后效应, 为分析这种滞后效应, 本研究计算了滇中地区植被 NDVI 旬值与前 1—15 旬气候因子的相关系数, 相关系数最大值代表相关性最强(表 2)。其中, 若相关系数最大值所对应的当前旬, 表明无滞后, 反之即表示为滞后, 相关系数最大值对应旬即为滞后的旬数。从表 2 可以看出, 就水分类气候因子, 对于 NDVI 而言, 除了平均水汽压滞后为 7 旬外, 降水量、平均相对湿度和最小相对湿度的滞后期为 4 旬和 5 旬, 即有 2 个月左右的滞后期。对于温度类气候因子, 平均气温和最低气温滞后期均为 8 旬, 最高气温滞后期为 10 旬, 即有 3 个月左右的滞后期。对应其它类型的气候因子而言, NDVI 对平均气压仅有 1 旬的滞后时间, 而风速和日照时数的滞后期分别为 4 旬和 5 旬, 即 2 个月左右。

4.2 人类活动与植被 NDVI 变化

人类活动对植被的影响分为正面效应(如退耕还林还草等生态工程)和负面效应(如城市扩展、人为森林破坏等)^[14], 退耕还林还草工程对区域生态环境的恢复和改善起到了巨大作用^[15-16]。云南省退耕还林工程自 2000 年开始试点、2002 年全面启动以来, 工程建设进展顺利。其中, 滇中地区内的昆明市、曲靖市和楚雄州均于 2000 年启动实施国家退耕还林工程, 玉溪市也自 2002 年启动实施退耕还林工程。由于这些工程的实施, 使滇中地区总退耕还林面积达 854.05 km², 荒山荒地造林及封山育林面积分别达 1 514.74 和 241.49 km²(表 3), 植被覆盖呈现逐渐上升的趋势, 表明生态工程的实施有效改善了区域生态环境, 极大地提升了滇中地区的植被整体覆盖程度。

这是滇中地区中高植被覆盖度和高植被覆盖度区面积增加的主要因素。此外,城市扩展往往导致城市周边植被遭到破坏,引起植被覆盖下降。如昆明市 1992 年以来,以老城区为核心并以年平均增长率 3.9% 的速度迅速向东南、西南和东北方向扩张^[17],导致城市

周边地区植被覆盖表现出下降趋势(图 2),说明城市扩张是导致植被覆盖下降的重要驱动因素。这在玉溪市、曲靖市和楚雄市首府所在地也有明显的体现,揭示了滇中地区极低植被覆盖度和低植被覆盖度区面积增加的主要原因。

表 2 植被 NDVI 旬序列与气候因子相关系数

| 旬号 | P | R_{mean} | R_{min} | V | T_{mean} | T_{min} | T_{max} | S | W | P_v |
|--------|---------|-------------------|------------------|---------|-------------------|------------------|------------------|--------|----------|----------|
| 当前旬 | 0.123* | 0.239** | 0.139** | 0.043 | 0.010* | 0.007 | 0.121* | 0.061 | -0.318** | 0.039 |
| 前 1 旬 | 0.144** | 0.366** | 0.319** | 0.145** | 0.021 | 0.018 | 0.137** | -0.030 | 0.366** | 0.052 |
| 前 2 旬 | 0.134* | 0.388** | 0.347** | 0.237** | 0.028 | 0.110* | 0.044 | 0.021 | 0.372** | 0.012 |
| 前 3 旬 | 0.277** | 0.448** | 0.422** | 0.328** | 0.101 | 0.192** | 0.011 | 0.006 | 0.386** | -0.008 |
| 前 4 旬 | 0.251** | 0.481** | 0.476** | 0.383** | 0.149** | 0.243** | 0.055 | 0.061 | 0.431** | -0.013 |
| 前 5 旬 | 0.430** | 0.475** | 0.450** | 0.436** | 0.216** | 0.310** | 0.117* | 0.090 | 0.407** | -0.142** |
| 前 6 旬 | 0.338** | 0.451** | 0.458** | 0.489** | 0.307** | 0.386** | 0.216** | 0.056 | 0.382** | 0.019 |
| 前 7 旬 | 0.368** | 0.393** | 0.420** | 0.510** | 0.373** | 0.440** | 0.288** | -0.013 | 0.324** | -0.090 |
| 第 8 旬 | 0.325** | 0.305** | 0.338** | 0.507** | 0.412** | 0.478** | 0.395** | -0.002 | 0.283** | -0.088 |
| 前 9 旬 | 0.296** | 0.253** | 0.277** | 0.493** | 0.467** | 0.490** | 0.427** | 0.027 | 0.208** | -0.079 |
| 前 10 旬 | 0.310** | 0.197** | 0.234** | 0.471** | 0.421** | 0.472** | 0.452** | 0.046 | 0.181** | -0.111* |
| 前 11 旬 | 0.336** | 0.213** | 0.236** | 0.451** | 0.452** | 0.467** | 0.418** | 0.077 | 0.148** | -0.068 |
| 前 12 旬 | 0.286** | 0.115* | 0.150** | 0.403** | 0.472** | 0.463** | 0.449** | 0.019 | 0.035 | -0.143* |
| 前 13 旬 | 0.256** | 0.116* | 0.162** | 0.350** | 0.401** | 0.405** | 0.371** | 0.040 | 0.021 | 0.043 |
| 前 14 旬 | 0.193** | -0.007 | 0.051 | 0.269** | 0.376** | 0.361** | 0.363** | 0.013 | 0.136* | 0.043 |
| 前 15 旬 | 0.138* | -0.096 | -0.046 | 0.189** | 0.332** | 0.294** | 0.344** | 0.047 | 0.166** | 0.025 |

注:**指通过 0.01 显著性检验;*为通过 0.05 显著性检验。 P 为 20~20 时降水量, R_{mean} 为平均相对湿度, R_{min} 为最小相对湿度, V 为平均水汽压, T_{mean} 为平均气温, T_{min} 为日最低气温, T_{max} 为日最高气温, S 为日照时数, W 为平均风速, P_v 为平均气压。

表 3 滇中地区退耕还林现状

km²

| 州市名称 | 统计时段 | 退耕地还林 | 荒山荒地造林 | 封山育林 | 合计 |
|------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 昆明市 | 2000—2010 年 | 167.34 | 297.35 | 28.04 | 492.73 |
| 玉溪市 | 2002—2010 年 | 168.01 | 263.35 | 108.04 | 539.39 |
| 曲靖市 | 2000—2010 年 | 263.35 | 537.36 | 91.34 | 892.04 |
| 楚雄州 | 2000—2010 年 | 255.36 | 416.69 | 14.07 | 686.11 |

5 结论

(1) 滇中地区年内植被 NDVI 旬值变动于 0.49~0.68 之间,2001—2010 年植被 NDVI 呈现出上升的趋势,速率为 0.03/10 a。整体而言,滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%,减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围,增加的区域主要集中在高海拔山区。

(2) 气候影响因素中的水分类因素即平均相对湿度、最小相对湿度和降水是滇中地区植被 NDVI 年内变化主要的影响因素。植被 NDVI 对水分类因子有 2 个月左右的滞后期,对温度类气候因子有 3 个月左右的滞后期。

(3) 滇中地区退耕还林工程的实施,极大地提升了滇中地区的植被整体覆盖程度,使滇中地区中高植被覆盖度和高植被覆盖度区面积增加,而城镇化过程则使得滇中地区极低植被覆盖度和低植被覆盖度区面积增加。

[参 考 文 献]

- [1] Nemani R, Keeling C D, Hashimoto H. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 2003, 300 (5625): 1560-1563.
- [2] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. Nature, 1993, 363 (6426): 234-40.
- [3] 白建军,白江涛,王磊. 2000—2010 年陕北地区植被

- NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. 2014, 34(7):882-887.
- [4] 毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982—2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析[J]. 地理科学, 2012, 32(9):1106-1111.
- [5] 张晓克, 鲁旭阳, 王小丹. 2000—2010 年藏北申扎县植被 NDVI 时空变化与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2014, 32(4):475-480.
- [6] 侯光雷, 张洪岩, 郭聘, 等. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3):285-292.
- [7] 赵文君, 谢飞帆. 利用 Modis-NDVI 时序数据分析滇中地区绿色覆被的变化特征[J]. 价值工程, 2014, 33(22):320-321.
- [8] 王金亮, 高雁. 云南省近 20 a 植被动态变化遥感时序分析[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(6):1-7.
- [9] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11):1417-1434.
- [10] 朱求安, 张万昌, 赵登忠. 基于 PRISM 和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J]. 地理科学, 2005, 25(2):233-238.
- [11] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 a 来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8):1019-1024.
- [12] 水利部. GB/SL190-2007. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中华人民共和国水利部, 2008.
- [13] 安如, 徐晓峰, 杨仁敏. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2):1-6.
- [14] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5):705-716.
- [15] 周洪建, 王静爱, 李睿, 等. 基于 SPOT-VEG NDVI 和降水序列的退耕还林(草)效果分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4):70-74.
- [16] 杨延征, 赵鹏祥, 郝红科, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的陕北植被覆盖时空变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7):1897-1903.
- [17] 赵璐, 苏怀. 基于遥感影像的 1992—2006 年昆明市城区扩张及驱动力分析[J]. 中国科技纵横, 2011, 35(10):17-19.

(上接第 251 页)

[参 考 文 献]

- [1] 余新晓, 张志强, 陈丽华, 等. 森林生态水文[M]. 北京:中国林业出版社, 2004.
- [2] 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 等. 云南高原金沙江流域森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):165-169.
- [3] 石媛, 鲁绍伟, 陈波, 等. 河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):92-97.
- [4] 王伟伟. 栓皮栎林分枯落物对土壤-植物系统水分运动的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3):105-111.
- [5] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14):3807-3819.
- [6] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 等. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(12):4105-4114.
- [7] 李学斌, 陈林, 张硕新, 等. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态[J]. 生态学报, 2012, 32(20):6575-6583.
- [8] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6):48-53.
- [9] Slodicak M, Novak J, Skovsgaard J P. Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 209(1/2):157-166.
- [10] 璩芳, 张万军, 刘秀萍. 太行山低山区枯落物分解及主要营养元素变化[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6):41-45.
- [11] 寇萌, 焦菊英, 尹秋龙, 等. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1337-1349.
- [12] 李荣, 张文辉, 何景峰, 等. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响. 应用生态学报, 2011, 22(1):14-20.
- [13] 尤健健, 张文辉, 邓磊. 黄龙山不同郁闭度油松中龄林林木形质评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):1945-1953.
- [14] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学, 2010, 46(10):6-14.
- [15] 马正锐, 程积民, 班松涛, 等. 宁夏森林枯落物储量与持水性能分析[J]. 水土保持学报, 2012, 24(4):199-203.