

太湖流域典型土地利用类型生态耗水分量的比较研究

吕文^{1,2}, 杨桂山¹, 万荣荣¹, 陶宇³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 江苏南京 210008;

2. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏苏州 215006; 3. 南京农业大学土地管理学院, 江苏南京 210095)

摘要: [目的] 对太湖流域典型土地利用类型的生态耗水分量进行比较研究, 为优化土地利用结构、提高流域生态系统水量调节能力提供理论基础。[方法] 应用田块尺度土壤—水—大气—植物模型(SWAP), 在太湖流域水汽通量监测试验基础上对林地、茶园和耕地的生态耗水进行数值模拟。[结果] ①林地蒸腾量占据耗水量的 87.80%, 在林地生态系统调节水量过程中起着重要作用, 生态耗水呈以 8 月为峰值的单峰曲线; ②茶园茶株蒸腾和株间蒸发占据耗水的 94.86%, 两者比值大约为 3:1, 茶株的人工修剪对各分量的年内变化有影响; ③耕地作物蒸腾和棵间蒸发占据了耗水量的 94.73%, 两者比值约 2:1, 并呈现麦季(1—5 月)和稻季(6—11 月)2 个时段特征; ④流域竹林枯枝落叶层厚, 树林冠层厚实, 园地茶株由于修剪后枝叶还未恢复, 耕地小麦和水稻作物有生长初始阶段, 所以林地相比园地和耕地土壤蒸发偏低。[结论] 3 种不同土地利用类型的植被在不同生长阶段的叶面积指数、人工修剪作用对耗水量年内变化可能也会产生一定的影响。

关键词: 生态耗水分量; SWAP 模型; 土地利用类型; 太湖流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)04-0103-06

中图分类号: S152.7

文献参数: 吕文, 杨桂山, 万荣荣, 等. 太湖流域典型土地利用类型生态耗水分量的比较研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 103-108. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.017. Lü Wen, Yang Guishan, Wan Rongrong, et al. Comparison of ecological water consumption's components of typical land use types in Taihu Lake basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 103-108.

Comparison of Ecological Water Consumption's Components of Typical Land Use Types in Taihu Lake Basin

LÜ Wen^{1,2}, YANG Guishan¹, WAN Rongrong¹, TAO Yü³

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. Suzhou

Substation of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou, Jiangsu 215006, China; 3. College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] Comparative study on ecological water consumption of typical land use types in Taihu Lake basin was conducted, in order to provide a theoretical basis for optimizing land use structure and improving water regulation capacity of the watershed ecosystem. [Methods] Based on water flux monitoring points, a field scale model, soil-water-atmosphere-plant model(SWAP), was applied to simulate the ecological water consumptions in forest land, tea garden and cultivated land. [Results] ① Ecological water consumption in the forest land showed a single peak from June to August, in which tree's transpiration contributed 87.80% of it, hence it played an important role in regulating the amount of water. ② Ecological water consumption in tea garden changed relatively in a flat mode during the year, tea plant transpiration (69.17%) and soil evaporation(25.69%) accounted for the majority of the water consumption together. ③ Yearly change of ecological water consumption in cultivated land had two obvious different periods, corresponding to wheat season (January to May) and rice growing season (June to November), respectively. Annual transpiration of cultivated land(61.28%) and the evaporation(33.45%) accounted for 94.73% of the water consumption. ④ The evaporation of forest land was relatively smaller than those of garden and cultivated land. This can

收稿日期: 2018-01-09

修回日期: 2018-03-21

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“太湖流域土地利用变化对生态服务功能影响机理与评估”(41030745); 国家自然科学基金青年项目“太湖流域水生态服务供需空间量化、格局演变与驱动机制”(41701211)

第一作者: 吕文(1986—), 女(汉族), 江西省九江市人, 博士, 工程师, 主要从事水环境分析与评价研究。E-mail: hwr_wlv@163.com.

ascribed as the following reasons: litter layer and canopy were thick in forest, whereas branch leaves did not recover in tea garden, and crops were at the stages of initial growth. [Conclusion] Annual variance of ecological water consumption was mainly affected by rainfall and temperature, but growth period of crops and tea pruning may also have their impacts on ecological water consumption.

Keywords: ecological water consumption's components; SWAP model; land use types; Taihu Lake basin

截留、蒸散发是陆地生态系统重要的水文过程^[1],受到气候和地表特征的共同影响,其中人类活动引起的土地利用/覆被变化,改变了地表反照率、植被覆盖度、叶面积指数、植被高度等因子,影响了冠层截留、蒸散发特征,改变了植被在水文过程中的调节作用^[2]。太湖流域社会经济发展迅速,土地利用变化剧烈,西部丘陵山区由于农业综合整治开发,大量次生林地转为茶园,耕地面积年平均递减率达 1.8%,城市建设用地扩展过快,地面可渗透面积减少,流域产水量相应增加^[3]。城市化使得最大洪峰量和洪水总量增大,汇流时间变短,加剧了流域暴雨洪水,而森林有利于缓和暴雨洪水这一过程^[4]。

为了解土地利用变化对流域水文循环的影响,需研究土地利用变化对生态系统内部水分运移过程的影响。本文利用土壤—水—大气—植物整合模型(soil-water-atmosphere-plant, SWAP)模拟太湖流域竹林、茶园和耕地生态耗水过程,以期揭示土地利用变化对生态系统耗水的影响,为优化土地利用结构,提高流域生态系统水量调节能力提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖流域位于中国长江三角洲南缘(119°11′—121°51′E, N30°28′—32°15′N),处于北亚热带和中亚带的过渡地带,东临大海,是东南季风盛行区域。全区年均气温 15.6℃,1 月平均气温 3.1℃,7 月平均气温 28.1℃;冬季极端最低气温全流域平均-11.6℃,夏季极端最高气温平均 39℃。年均降雨量 1 153.6 mm,年际变化较大,年内分配不均匀,75%左右的降水集中在 4—10 月。流域 20 m² 蒸发池的年水面蒸发量 800~1 100 mm。在太湖流域建立耕地、林地和园地 3 种典型土地利用类型水汽通量监测区域。耕地监测区位于太湖流域北部无锡市锡山区(120°33′E, 31°39′N),主要为稻麦/油轮作,小麦播种时间为 12 月初左右,5 月底收割;水稻 6 月中旬移栽,约在 11 月底收割。林地监测区位于流域西南部丘陵山地浙江省安吉县(119°34′E, 30°18′N),以 2~3 年生竹为主,林下灌木草本少。园地监测区位于宜兴市西渚镇(119°35′E, 31°15′N),属于流域湖西分区低山丘陵地带,以 3,9 和 20 a 植茶年龄为主,5 月中旬

采茶完进行修剪。

1.2 试验方法

1.2.1 涡度相关监测系统 耕地开路式涡度相关系统观测塔高约 7 m,在 3.5 m 高处迎着主风向(SE)焊接一铁臂,安置超声风速计 CSAT3 和 CO₂/H₂O 红外气体分析仪 EC150(Campbell, USA)。在铁臂的另一端,安置温湿度传感器 HMP155 A(Vaisala, Finland)、辐射传感器 LP02(Hukseflux, Netherlands)、翻斗式雨量筒 TE525 MM(Texas Electronics, USA)分别测量气温、湿度、净辐射和降水量。

竹林涡度监测系统装有一套开路涡度相关系统,安装在 17 m 高度的观测塔上,由三维超声风速仪 CAST3(Cambell Inc., USA)和开路 CO₂/H₂O 分析仪 Li-7500(LiCorInc., USA)组成。在 1,5,17 m 高度上分别装有 3 层风速(010C, metone, USA)和大气温湿度仪(HMP45 C, Vaisala, Finland)。净辐射仪(CNR4, Kipp & Zonen, Holland)安装在 17 m 高塔上。

1.2.2 箱式法监测系统 茶园和耕地水汽通量监测研究采用的是静态箱/红外气体分析法,属于闭路箱式法^[5]。配套设施有 1 m 直径,50+70 cm 或 70+80 cm 的分段式有机玻璃材质的明箱、顶部装有 2 个小型风扇、Li-840A 红外气体分析仪(LiCorInc., USA)、抽气泵和蓄电池等。由于气体分析仪的抽气采样,可能导致闭路箱式系统气体交换箱内外压力差,试验设计时,将出气口返回箱内^[6]。因为箱体内植物叶片光合和蒸腾作用或者土壤呼吸作用将引起密封箱体内的 CO₂ 和 H₂O 浓度变化^[7],影响箱体的稳定状态,所以每次尽量减少箱体密闭时间,快速测定箱内气体浓度。

1.2.3 植被生态监测 按照不同植被的生长阶段,定期或关键生长期加密监测叶面积指数(LAI)、作物高度(H_{crop})、根系深度(D_{root})。耕地和茶园叶面积指数(LAI)使用美国 LAI-2200 植物冠层分析仪监测。

茶园覆盖度采用各随机量取 10 对茶株行间距(L_1 , cm)和陇间距(L_2 , cm),覆盖度计算公式为:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_2} \quad (1)$$

1.3 涡度相关法与箱式法数据校正

将耕地小麦季监测期内 3 月 25 日至 5 月 16 日

的不同时段,涡度相关法和静态性/红外气体分析法监测所获得的所有 2 h 累计的蒸散量(mm/2 h)进行拟合,根据模型的复相关系数 R 值以及 F 值,选择幂指数曲线模型,转换计算箱式法监测获得的蒸散量,与涡度相关法的结果进行相关分析,两者呈显著相关性(0.749***)。

$$y=0.291x^{0.412} \quad (R^2=0.61^{**}) \quad (2)$$

1.4 SWAP 模型

SWAP 模型是微观系统水分运移模拟模型的典型代表,在世界不少地方取得了较好效果,受到了较广泛接受和认可,主要用于田间尺度下土壤—植物—大气环境中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长的模拟^[8]。

1.4.1 模型输入数据 气象数据统一采用 2010 年常州国家气象台站(119°59'E, 31°53'N)的日观测资料,包括日均气温、最高气温、风速、降雨量、日照时数以及实际水汽压等。水稻和小麦两种 D_s (作物生长阶段)按照作物生长日期定义为线性函数,作物出苗前一天定义为 0,成熟期为 2,其他数值依据作物生育期的时段在 0~2 之间插值计算。林地和茶园 D_s 依据年内 12 个月,将 1 月设为 0 月,12 月设定为 2,其他月份在 0~2 之间插值计算得出。依据实际野外观测资料和参考文献,建立流域典型植被类型,竹林、茶园、耕地稻/麦轮作 3 种类型的叶面积指数、植被高度和根系深度的关系表(表 1—2)。

依据耕地实测土壤机械组成(表 3),林地^[11]和园地^[12]采用参考文献中机械组成,经过 HYDRAUS-1 D 模型计算获得土壤特征水分曲线参数,饱和渗透系数和饱和含水量(表 4)。其他参数引自 SWAP3.2 手册附表^[8]。由于耕地地下水位浅,约距地表 60 cm 处,水分在上下层之间交换较多,因此 3 种土地利用类型模拟时,下边界均按照自由通量边界处理。

表 4 Mualem-van Genuchten 模型参数

类型	深度/cm	$\theta_{res}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_{sat}/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$K_{sat}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	a/cm	n
耕地	20	0.047 4	0.411	38.33	0.005 3	1.64
	40	0.047 9	0.411	37.85	0.005 3	1.64
	60	0.049 8	0.416	36.00	0.004 8	1.67
林地	—	0.061 7	0.393	15.67	0.024 1	1.36
茶园	—	0.096 1	0.486	13.40	0.011 1	1.42

注: θ_{res} 为残余含水率; θ_{sat} 为饱和含水率; K_{sat} 为饱和导水率; a 为与进气吸力有关的参数; n 为决定土壤水分特性曲线的形状系数。

1.4.2 模型率定与验证 采用 2012 年 4 月和 10 月无锡市锡山碳水通量站和 2011 年 10—11 月安吉县碳水通量站的气象资料驱动 SWAP 模型,获得耕地麦季、稻季,以及林地的蒸散量。按照初始给定的模型

表 1 耕地稻/麦轮作作物生态参数

D_s	耕地					
	水稻			小麦		
	LAI	H_{crop}/cm	D_{root}/cm	LAI	D_{root}/cm	D_{root}/cm
0.38	0.14	15.00	20.00	—	15.30	13.30
0.98	—	45.00	—	—	18.00	—
1.23	—	67.00	—	1.78	27.33	—
1.38	2.67	—	—	3.59	44.67	—
1.66	—	85.00	—	4.10	69.00	—
1.82	—	103.00	—	4.91	83.33	90.32
2.00	5.20	115.00	100.00	—	71.33	100.25

注:部分叶面积指数(LAI)引自冬小麦 LAI 变化过程^[9]。 H_{crop} 、 D_{root} 分别表示株高和根系深度。下同。

表 2 竹林和茶园植被生态参数

D_s	林地			园地		
	LAI	H_{crop}/cm	D_{root}/cm	LAI	D_{root}/cm	D_{root}/cm
0.00	3.30	850	60	—	—	70
0.18	3.10	—	—	—	—	—
0.36	3.61	—	—	—	118.33	—
0.54	3.80	900	70	3.25	121.67	73
0.72	4.00	—	—	1.67	80.51	—
0.90	5.30	—	—	—	55.58	—
1.08	6.40	950	75	—	70	75
1.26	7.30	—	—	—	103	—
1.44	6.70	980	95	—	117	78
1.62	5.90	—	—	—	120	—
1.80	5.00	—	—	—	98	—
2.00	3.00	1 000	100	—	90	80

注:竹林参数引自文献^[10]。

表 3 典型土地利用类型土壤机械组成 %

土地利用类型	黏粒	粉砂	砂
耕地	10.4	54.2	35.4
林地	21.3	22.9	56.8
茶园	40.2	48.2	11.6

参数作物阻力(r_{crop})、反射系数 α_r 、净辐射在植被冠层中的消减系数 K_{gr} 、临界压力水头 h_3 、 α_r 、 α 、 λ 、 n 带入模型计算,将模拟蒸散量结果与实测值比较,调整参数,使得最大程度接近实测值,最终率定参数(表 5)。利用

研究资料对模型的适用性进行验证。计算模拟结果与监测值间的相关系数 (R^2) 和均方根预测误差 (RMSPE), 耕地麦季、稻季, 林地和茶园 ET 的模拟结果较理想, 其 R^2 分别为 0.89, 0.75, 0.71 和 0.81, RMSPE 分别为 0.42, 0.58, 0.13, 1.00。模拟结果表明, SWAP 模型率定参数后能够呈现耕地稻/麦轮作、林地和茶园等太湖流域典型土地利用类型生态系统耗水过程。

表 5 模型率定参数

参数	麦季	稻季	林地	茶园
作物阻力 r_{crop}	75	75	200	100
反射系数 α_r	0.23	0.18	0.15	0.16
消光系数 K_{gr}	0.30	0.30	0.80	0.40

2 结果分析

2.1 林地生态系统耗水及各分量变化

林地生态系统耗水量各分量变化区别较大(表 6), 其中, 植被蒸腾、蒸发和冠层截留依次为 851.51, 23.33, 94.99 mm, 植被蒸腾量占总耗水比例范围为 74.91%~97.40%, 平均值为 87.80%, 在林地生态系统调节水量过程中起着重要作用, 蒸腾量并且这种作用在全年生态系统耗水中均能体现, 而林内土壤蒸发和截留分别仅占耗水的 2.41% 和 9.79%。

据陈仁升等^[13]基于水热连续方程模拟青海云杉林截留、蒸腾和蒸发量分别为 79.2, 209.1 和 23.3 mm, 从总量上来看, 截留与蒸发与本文模拟的结果基

本一致, 但蒸腾量相差较大, 可能与研究区域有关, 青海云杉林降雨天数较大, 叶片内外的蒸汽压差较小, 并且植物气孔开放程度受到影响, 叶片蒸腾作用受到抑制。刘晨峰等^[14]运用涡度相关法、树干液流、土壤水分监测系统监测北京生长季(5—10月)杨树林, 植物蒸腾量为 281 mm, 土壤蒸发为 165 mm, 截留量为 46 mm, 年降雨量为 444 mm, 并且在 5—7 月, 蒸腾与蒸发量相当, 这与本文模拟的结果分别为 581.78, 9.49, 61.68 mm 相差较大, 与田凤霞^[15]研究结果认为林地土壤蒸发占比很低的结论不一致, 分析原因, 可能是因为人工杨树林种植密度 2 m×2 m, 年龄才 3~4 a, 多为培养 5~6 a 木材, 因此树林冠层还不够厚实, 棵间土壤接受到更多的净辐射, 并且据杨立文^[16]通过对太行山侧柏和油松林地土壤蒸发研究, 发现林地枯枝落叶覆盖下的土壤日蒸发量约是裸露土壤蒸发的 1/4, 而太湖流域的林地, 枯枝落叶层厚, 树林冠层厚实, 所以本文模拟的土壤蒸发量偏低。林地生态系统耗水量年内变化呈现典型的单峰型, 并且在 5—9 月, 由于降雨充沛, 竹林处于生长旺盛时期, 形成一个生态系统耗水量和蒸腾量的峰值平台, 平均值约为 115.70, 102.77 mm。林地的截留量 7—9 月均值为 15.21 mm, 因为此时段林地 LAI 较大, 并且降雨量丰富, 所以略高于其他月份的均值 5.48 mm, 总体上, 由于太湖流域雨热同期, 在降雨、气温都较高的季节, 林地的耗水、蒸腾、截留量随着冠层郁闭度和叶面积指数的增大而增加。

表 6 林地生态系统耗水各分量月变化

月份	耗水量/mm	蒸腾/mm	蒸发/mm	截留/mm	蒸腾/耗水/%	蒸发/耗水/%	截留/耗水/%
1	37.51	32.59	1.34	3.58	86.88	3.57	9.54
2	38.26	28.66	2.86	6.74	74.91	7.48	17.62
3	56.51	42.64	4.07	9.80	75.46	7.20	17.34
4	68.88	55.30	4.11	9.47	80.28	5.97	13.75
5	105.94	96.16	3.63	6.15	90.77	3.43	5.81
6	107.89	101.57	2.19	4.13	94.14	2.03	3.83
7	126.19	103.68	1.57	20.94	82.16	1.24	16.59
8	140.87	128.96	0.75	11.16	91.55	0.53	7.92
9	97.59	83.46	0.60	13.53	85.52	0.61	13.86
10	74.47	67.95	0.75	5.77	91.24	1.01	7.75
11	59.63	58.08	0.50	1.05	97.40	0.84	1.76
12	56.09	52.46	0.96	2.67	93.53	1.71	4.76
合计	969.83	851.51	23.33	94.99	87.80	2.41	9.79

2.2 园地生态系统耗水及各分量变化

从园地生态系统耗水各分量年总占比来看(表 7), 茶株蒸腾(69.17%)和株间蒸发(25.69%)占据耗

水的 94.86%, 蒸腾和棵间蒸发比大约为 3:1。据孟平等^[17]采用热扩散式树干边材液流探针测定技术对太行山南麓的苹果树进行蒸腾监测, 发现全年蒸

腾量约 500~600 mm,与本文模拟的茶园蒸腾量(626.31 mm)结果一致。

据杨帆等^[18]运用大型非称重式蒸渗仪对太行山低山区黄背草、荆条及其复合群落蒸发蒸腾进行了研究,结果表明,在整个生长季植被群落蒸腾、蒸发比大约为 4:1,与本文的结果相近,相比林地蒸腾蒸发比 43:1 要小很多,主要可能与林地、园地的叶面积指数大小以及林下或棵间覆盖物有关。茶园生态系统耗水量变化范围为 43.49~106.43 mm,月均耗水量为 75.45 mm。但蒸腾和蒸发在年内变化不一致,土壤蒸发在 7 月出现一峰值 41.53 mm,与占该月份耗

水量的 46.03%,此时气温和净辐射均达到一年中的峰值,茶株由于修剪后枝叶还未恢复,株间接受的净辐射大大增加,土壤蒸发增大;在茶株修剪后(5—9 月),由于降雨充沛,气温回升,虽然由于修剪叶面积指数大大下降,但是修剪左右刺激了茶株的生长,体内新成代谢作用加强,消耗了大量水分,茶株蒸腾作用相比 1—3 月较强,也有待于茶株树干茎流的监测进行验证。茶株即将被修剪前(2—4 月),枝叶最繁盛,此时段截留量占总耗水量的比例比其他月份相对较大,截留的这种季节变化特征也与茶园特有的人工修剪作用有密切关系。

表 7 园地生态系统耗水及各分量月变化

月份	耗水量/mm	蒸腾/mm	蒸发/mm	截留/mm	蒸腾/耗水/%	蒸发/耗水/%	截留/耗水/%
1	48.48	35.60	9.14	2.46	73.43	18.85	5.07
2	43.49	25.95	12.27	5.27	59.67	28.21	12.12
3	61.46	37.38	16.67	7.24	60.82	27.12	11.78
4	67.55	38.93	25.65	6.36	57.63	37.97	9.42
5	102.26	74.58	24.05	2.40	72.93	23.52	2.35
6	86.52	68.68	17.88	1.31	79.38	20.67	1.51
7	90.22	39.50	41.53	7.18	43.78	46.03	7.96
8	106.43	78.88	23.07	4.14	74.11	21.68	3.89
9	83.80	57.04	22.02	5.46	68.07	26.28	6.52
10	80.43	56.70	20.16	2.55	70.50	25.07	3.17
11	65.70	55.45	9.89	0.53	84.40	15.05	0.81
12	69.11	57.62	10.24	1.67	83.37	14.82	2.42
合计	905.45	626.31	232.57	46.57	69.17	25.69	5.14

2.3 耕地生态系统耗水及各分量比较

耕地由于稻/麦轮作方式,耗水呈现明显的麦季(1—5 月)和稻季(6—11 月)2 个时段特征,耗水总量分别为 353.06 mm,429.51 mm,麦季略低于稻季总耗水,与郭瑞萍等^[19]研究的农田种植作物中,水稻蒸散耗水量最大,其次为小麦的研究结果一致,可能由于麦季总体气温较低以及水稻田由于淹水水分充足等因素有关。在耕地耗水各分量方面(表 8),作物蒸腾和棵间蒸发占据了耗水量的 94.73%,分别为 61.28%和 33.45%,刘昌明等^[20]研究的整个生育期小麦蒸腾与棵间蒸发比为 7:3,莫兴国等^[21]研究的小麦返青至乳熟期,蒸腾与棵间蒸发比为 4:1,前者与本文模拟的结果大约 2:1 相近,后者比本文模拟的结果偏小,分析原因,他们的研究区域均在栾城试验站,消除了地域的差异,但由于所选择的生育期间不同,刘昌明等分析的是全生育期,而莫兴国分析的是返青至乳熟期,在冬小麦越冬期间,其可见蒸发占比相当大,大约为 73%,加大了整个生育期的蒸腾蒸发比。

小麦截留量在 3—5 月,占降雨量的 9.45%,相比小麦生育期初始阶段由于尚未旺盛生长,枝叶不繁盛时的截留量占比(4.00%)较高;同样稻季时,生育后期截留量占比相比前期较大。在小麦和水稻作物生长初始阶段,土壤无效蒸发量较大,之后蒸腾作用逐渐增大,这种耕地耗水量以及各分量的年内变化主要与农作物的生长阶段有关。据张仁华等^[22]研究发现,4 月中旬前,华北平原小麦地土壤棵间无效蒸发和作物蒸腾量级是相当的,有 1/2 左右的水分不能参与作物光合作用,并因此提出采用薄膜覆盖和秸秆覆盖等抑制棵间土壤水分蒸发的农业节水措施,之后蒸散由土壤蒸发和冠层蒸腾叠加而成。莫兴国等^[21]研究结果也表明小麦初期,土壤蒸发占比较大,有时超过 50%的蒸散量,当叶面积指数较大时,土壤蒸发占比变小,蒸散主要由蒸腾贡献,因为蒸散作用受气候条件的强烈影响,虽然日变化幅度较大,但随着净辐射的逐渐增加、气温回暖、冠层的蒸发面积增大,有一个明显的上升趋势。

表 8 耕地生态系统耗水及各分量月变化

月份	耗水量/mm	蒸腾/mm	蒸发/mm	截留/mm	蒸腾/耗水/%	蒸发/耗水/%	截留/耗水/%
1	31.70	15.88	15.57	0.40	50.09	49.12	1.26
2	48.59	23.47	21.93	3.27	48.30	45.13	6.73
3	73.52	43.23	21.81	8.23	58.80	29.67	11.19
4	83.09	49.86	27.14	10.13	60.01	32.66	12.19
5	116.16	83.64	22.32	5.77	72.00	19.21	4.97
6	19.23	0.31	19.23	0.22	1.61	100.00	1.14
7	73.04	24.65	49.14	0.57	33.75	67.28	0.78
8	95.07	67.02	24.92	2.85	70.50	26.21	3.00
9	80.24	52.67	22.32	6.05	65.64	27.82	7.54
10	85.68	61.77	19.60	3.63	72.09	22.88	4.24
11	76.25	64.83	9.29	0.75	85.02	12.18	0.98
12	14.21	0.95	13.26	0.10	6.69	93.31	0.70
合计	796.78	488.28	266.53	41.97	61.28	33.45	5.27

3 结论

林地植被蒸腾量占据耗水量的 87.80%，蒸腾蒸发比约为 43:1；园地茶株蒸腾(69.17%)和株间蒸发(25.69%)占据耗水的 94.86%，蒸腾和棵间蒸发比大约为 3:1；耕地耗水各分量中，作物蒸腾(61.28%)和棵间蒸发(33.45%)占据了耗水量的 94.73%，蒸腾与棵间蒸发比约为 2:1。可知，流域 3 种典型生态系统水量分配差异较大，竹林蒸腾作用在林地生态系统水量调节过程中起着重要作用，园地和耕地棵间蒸发作用相比林地较大。流域竹林枯枝落叶层厚、树林冠层厚实，土壤蒸发较小；园地茶株由于修剪后枝叶还未恢复，株间土壤蒸发偏大；耕地小麦和水稻作物生长初始阶段，土壤无效蒸发量较大，所以林地相比园地和耕地土壤蒸发偏低，3 种生态系统水量分配差异与其土地利用类型有密切关系。

林地生态系统耗水量年内变化呈现以 6—8 月为蒸腾高值时段、8 月为峰值的单峰曲线。园地茶株修剪后(5—9 月)蒸腾作用相比 1—3 月强；土壤蒸发在 7 月出现一峰值，占该月份耗水量的 46.03%；茶株修剪前(2—4 月)，枝叶最繁盛，此时段截留量占总耗水量的比例比其他月份较大。耕地生态系统耗水呈现明显的麦季(1—5 月)和稻季(6—11 月)2 个时段特征，小麦截留量(9.45%)在 3—5 月相比小麦生育期初始阶段占比(4.00%)较高；稻季时，生育后期截留量占比相比前期较大；小麦和水稻作物生长初始阶段，土壤无效蒸发量较大，之后蒸腾作用逐渐增大。太湖流域雨热同期，在降雨、气温都较高的季节(6—8 月)，林地的耗水、蒸腾、截留量随着冠层郁闭度和叶面积指数的增大而增加。茶园生态耗水年内变化与林地相近，虽然由于修剪叶面积指数大大下降，但是

修剪左右也刺激了茶株的生长，在气温高的时期，蒸腾作用也增大了，茶株由于修剪后枝叶还未恢复，土壤蒸发也增大了。耕地耗水量以及各分量的年内变化在受到降雨、气温影响的同时，还主要与农作物的生长阶段有关。小麦、水稻生长初期，土壤蒸发占比较大，当叶面积指数较大时，土壤蒸发占比变小，蒸散主要由蒸腾贡献，截留量占比也相比前期较大。3 种生态系统水量年内变化在受到流域降雨、气温等因素影响的同时，不同土地利用类型的植被在不同生长阶段的叶面积指数、人工修剪作用对耗水量年内变化可能也会产生一定的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. Microclimate—the Biological environment of plants[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [2] Eagleson P S. Ecohydrology[M]. UK: Cambridge University, 2002.
- [3] 高俊峰, 闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 194-200.
- [4] 万荣荣, 杨桂山, 李恒鹏. 流域土地利用/覆被变化的洪水响应: 以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 10-15.
- [5] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem[J]. Global Change Biology, 1999, 5(2): 169-182.
- [6] 吕文, 杨桂山, 万荣荣, 等. 太湖流域西部丘陵茶园修剪前后蒸散速率的比较分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 184-191.
- [7] 袁凤辉, 关德新, 吴家兵, 等. 箱式气体交换观测系统及其在植物生态系统气体交换研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1495-1504.

主要影响因素出发,总结取土场生态修复中的技术要点并采取相应的治理措施,形成了完整的取土场生态修复技术体系。施工效果表明,削坡后的取土场稳定性良好,坡面排水效果较好,坡面保持平整及无水土流失,坡面植物覆盖率达到恢复要求。在施工时最大限度地利用剥离表土和当地其他资源,不仅降低了生态修复的成本,而且避免了获取材料和资源对当地生态系统的破坏,实现了经济效益和环境效益的最大化。

[参 考 文 献]

- [1] 张展,高照良,宋晓强,等.我国高速公路建设对生态环境的影响初探[J].水土保持通报,2008,28(5):33-38.
- [2] 印建文.高寒地区路基草皮护坡及草皮水沟施工技术[J].西部探矿工程,2008,20(1):211-213.
- [3] 孙宏义,徐增友,董治宝.黄土高原北部风沙区喷播植物护坡研究[J].西安科技学院学报,2004,24(1):86-89.

- [4] 徐华,李天斌,周雄华,等.高寒地区JYC生态基材护坡现场试验及测试研究[J].岩土工程学报,2009,31(5):799-804.
- [5] 汪有奎,杨全生,郭生祥,等.祁连山北坡森林资源变迁[J].干旱区理,2014,37(5):966-979.
- [6] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等.恢复生态学理论在水电工程扰动区边坡生态修复中的应用[J].长江科学院院报,2015,32(7):52-57.
- [7] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区生态修复技术研究综述[J].水利水电技术,2017,48(2):130-137.
- [8] 李虎,叶建军,王冠海,等.基于水平微分法的护坡工程袋柔性挡墙的力学分析[J].科学技术与工程,2018,18(4):129-136.
- [9] 丰瞻,许文年,李少丽,等.基于恢复生态学理论的裸露山体生态修复模式研究[J].中国水土保持,2008(4):23-26.
- [10] 郭爽,牛小云,吴桐,等.不同植被恢复类型对高速公路边坡土壤质量的影响[J].土壤通报,2018(1):84-92.

(上接第108页)

- [8] Kroes J G, Van Dam J C, Groenendijk P, et al. SWAP version3.2.: Theory description and user manual[M]. Wageningen: Alterra, 2008.
- [9] 康绍忠,熊运章.干旱缺水条件下麦田蒸散量计算方法的研究[J].地理学报,1991,45(4):475-483.
- [10] 陈三雄.浙江安吉主要植被类型土壤水土保持功能研究[D].江苏南京:南京林业大学,2006.
- [11] 徐秋芳,徐建明,刘力,等.安吉县港口乡低产毛竹林地肥力分析[J].浙江林学院学报,2000,17(3):280-284.
- [12] 张燕,杨浩,金峰,等.宜兴茶园土壤侵蚀及生态影响[J].土壤学报,2003,40(6):815-821.
- [13] 陈仁升,康尔泗,吕世华,等.内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型:地面资料驱动结果[J].地球科学进展,2006,21(8):819-829.
- [14] 刘晨峰,张志强,孙阁,等.基于涡度相关法和树干液流蒸发评价杨树人工林生态系统蒸发散及其环境响应[J].植物生态学报,2009,33(4):706-718.
- [15] 田风霞,赵传燕,冯兆东.祁连山区青海云杉林蒸腾耗

- 水估算[J].生态学报,2011,31(9):2383-2391.
- [16] 杨立文,石清峰.太行山主要植被枯枝落叶层的森林水文作用[J].林业科学研究,1998,10(3):283-288.
- [17] 孟平.苹果蒸腾耗水特征及水分胁迫诊断预报模型研究[D].湖南长沙:中南林学院,2005.
- [18] 杨帆,张万军.太行山低山区不同植被群落蒸发蒸腾研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):30-34.
- [19] 郭瑞萍,莫兴国.森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J].应用生态学报,2007,18(8):1751-1757.
- [20] 刘昌明,张喜英,由懋正.大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J].水利学报,1998(10):36-39.
- [21] 莫兴国,刘苏峡,于沪宁,等.冬小麦能量平衡及蒸散分配的季节变化分析[J].地理学报,1997,52(6):636-542.
- [22] 张仁华,孙晓敏,刘纪元,等.定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异[J].中国科学(D辑):地球科学,2001,31(11):959-958.