

滇池流域荒台地植被恢复工程控制面源污染生态机理

王震洪¹, 吴学灿², 李英南²

(1. 贵州大学生命科学学院生态环境系, 贵阳 550025; 2. 云南省环境科学研究所, 昆明 650331)

摘要: 利用标准径流小区技术研究了滇池流域荒台地植被恢复工程对水土及氮磷面源污染物控制效应, 用枝叶吸附水量和土壤入渗特征指标评价了恢复的植被树冠截留和径流控制能力, 分析了植物枝叶形态特征差异与树冠截留, 人工植被恢复与径流调控的关系。结果表明, 圣诞树、旱冬瓜和香根草对地表径流、土壤侵蚀及氮磷流失具有良好的控制作用。树冠截留能力强、土壤水库容量大的人工植被系统将导致地表径流、土壤侵蚀、氮磷流失显著减少。叶子小、无角质化、表面粗糙、有表皮毛、含水量低、生物量高, 枝表面呈中等粗糙、不分泌脂类物质的植物, 具有较高的鲜重吸附水率, 能增加人工植被树冠截留。整地过程、植物根系生长和林隙灌草丛的自然恢复改善了荒台地土壤入渗性能, 减少了地表径流, 最终减轻了面源污染负荷。

关键词: 滇池流域; 荒台地; 人工植被; 面源污染物控制机理

中图分类号: X171.4, S157, S718.542 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)01-0037-06

Ecological Mechanisms of the Effects of Vegetation Restoration on the Controls of Non-Point Source Pollution on Barren Tableland in Dianchi Watershed of China

WANG Zhen-hong¹, WU Xue-can², LI Ying-nan²

(1. Department of Ecological Environment of College of Life Science of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Environment Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650331, China)

Abstract: Surface runoff, soil erosion and the leaching of the different forms of nitrogen and phosphorus were observed and the hygroscopic volume of branch and leaves of all plant species and soil penetration were determined to understand the ecological mechanisms of the effects of vegetation restoration on the controls of nonpoint source pollution on barren tableland in Dianchi Watershed of China. Results indicated that there were significantly relationships between surface runoff volume and the output of nonpoint pollution matters. The different manmade vegetation systems, consisted respectively of *A. nepalensis*, *A. meurnsii*, *R. pseudoacacia* and *V. zizanioides* clump, had shown the different potentials to control the leaching of TN, TP, soluble TP, soluble TN. Strong hygroscopic functions of leaves and branch was able to promote the interception of rainfalls and give rise to the less of surface runoff. The leaves, that were small, with low water content, no leathery and have rough face and epidermal wools, were able to got the highly ratio of the hygroscopic volume to aboveground fresh standing crops and strengthened the interception of forest canopy. Preparing soil, growth of root system of plant and the natural recovery of vegetation at the gap of trees enhanced surface runoff penetration, as lightened the surface runoff leaching the different forms of nitrogen, phosphorus of soil on the stands. The leaching of different forms of nitrogen and phosphorus went down with the controls of surface runoff in different stands as well.

Key words: Dianchi watershed; barren tableland; vegetation restoration; nonpoint source pollution control; effect mechanisms

在滇池流域, 台地位于山地和湖滨之间, 包括农田、园地、林地、灌丛、荒地、旱地等土地利用类型, 占陆地面积的 36.3%, 但产生的面源污染物却占 89.9%。其中, 灌丛、荒地、旱地受人类干扰强烈, 约占台地总面积一半, 统称荒台地。荒台地植被覆盖、生物量、生产力低, 降雨树冠截留效应差, 径流入渗能力弱, 易产生超渗径流和超饱和径流, 导致严重的土壤侵蚀和氮磷流失。该区汇集的径流还加剧了沟(河)道、居民点、道路面源污染物的溶解和向保护水体输送, 是导致滇池面源污染的主要区域^[1]。

国内外的研究显示, 地表径流量与面源污染物流失高度相关, 减少地表径流量以达到面源污染控制是解决问题的关键^[2~6]。希望通过植被恢复工程办法, 增强荒台地植被截留降雨能力, 提高土壤入渗

性能, 控制地表径流, 减轻地表径流溶解和输送面源污染物, 降低滇池水体面源污染负荷。但在理论上, 目前还不了解具有良好树冠截留效应的植物形态特征, 人工植被培育中采用什么生态过程和群落结构能导致土壤入渗性能的改善, 因而影响了荒台地控制面源污染的植被恢复工程技术创新。因此, 本研究的目的是: ①选择滇池地区几个适生树种, 培育人工植被系统, 比较不同系统氮磷及水土流失控制能力; ②研究影响氮磷及水土流失控制的树冠截留和土壤入渗过程, 分析植物形态特征对树冠截留和人工植

收稿日期: 2005-01-28; 修订日期: 2006-06-20

基金项目: 国家科技攻关项目(K99-05-35-02), 水利部长江上中游水土保持局基金项目(长水保函 2002 第 5 号)

作者简介: 王震洪(1966~), 男, 博士, 教授, 从事生态学研究。

被生态过程增加地表径流入渗的机理, 提出面源污染控制的最优植被结构。

1 试验地概况

试验地位于滇池东岸, 为退化灌丛, 海拔 1 900 ~ 2 000 m, 中亚热带季风气候, 年平均降水量 940mm, 降水 80% 集中在 5~ 10 月, 年平均气温 14.5℃, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 4 490.3℃, 年平均日照时数 2 440.7h. 土壤为黄粘壤土, 母质为含磷砂页岩. 试验树种为圣诞树 *Acacia mearnsii*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、旱冬瓜 *Alnus nepalensis*、墨西哥柏 *Cupressus lusitanica*, 并以香根草 *Vetiveria zizanioides* 为对照, 2000 年通过大塘整地方式栽植. 人工植被密度为: 圣诞树, $2 \times 3\text{m}$; 刺槐、墨西哥柏, $2 \times 2\text{m}$; 旱冬瓜, $3 \times 3\text{m}$. 香根草作条带种植, 带宽 30 cm, 带间距 3 m, 带内株行距 $0.2 \times 0.2\text{m}$. 3 年生林分平均高是: 圣诞树, 3.48m; 刺槐, 1.33m; 旱冬瓜, 2.2 m; 墨西哥柏, 2.18 m. 人工植被中自然恢复的植物种有滇青冈 *Cyclobalanopsis glaucotides*、黄泡 *Rubus obcordatus*、铁子 *Myrsine africana*、卵叶南烛 *Lyonia ovalifolia*、老鸦炮 *Vaccinium fragile*、云南松 *Pinus yunnanensis*、棠梨 *Pyrus pashia* 等。

2 研究方法

2.1 不同人工植被地表径流、土壤侵蚀、径流中泥沙和氮磷流失测定

用标准径流小区法测定地表径流^[7~9]. 降雨量用雨量桶观测. 降雨径流后, 充分搅匀池中径流, 用分层取样器取径流样本 1 000mL, 置于 2℃ 条件下保存. 剩余径流从排水口排出, 并清洗径流收集池, 关闭排水阀门. 径流中泥沙含量用烘干法分析. 根据单位体积径流泥沙含量和每次降雨产流量计算小区土壤侵蚀. 径流中总氮测定用半微量开氏法, 总磷用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法^[10]. 在 2001~ 2003 年时段内, 观测 2001、2002 年全部 16 次产流降雨和 2003 年主要 3 次产流降雨产生的径流量, 并对径流中土壤侵蚀和氮磷流失进行了测定. 认为所获数据代表了几种植被类型对氮磷及水土流失控制的总趋势。

2.2 不同人工植被树冠截留效应评价

树冠截留效应研究一般利用螺旋槽沟技术测定树干径流、穿透降雨, 计算树冠截留, 评价树冠在各种降雨特征条件下的截留规律等^[9, 11~13]. 这种方法

研究不同植物群落对降雨特征的反应具有便利性, 但要研究植物群落结构因子如群落中不同植物形态特征、草本和灌木层植物对降雨再分配的作用时, 就很不方便. 由于树冠截留不仅与降雨特征有关, 还与植物群落结构有关. 从生态学的角度, 植物群落结构的影响更重要, 因为群落结构是人类可通过树种配置等方式来调控的. 因此, 本研究提出植物枝叶吸附水指标, 用来评估植物形态特征、灌木和草本植物层对树冠截留的影响. 植物枝叶吸附水是植物枝叶通过表面吸附的雨水、露水、水蒸气等. 树冠截留由枝叶吸收部分和向空气蒸发部分构成. 在发生枝叶吸收和蒸发前, 雨水必须被吸附, 枝叶吸附水越多, 吸收和蒸发量就越大, 截持量也就越大. 枝叶吸附量会影响树冠截留量, 枝叶吸附水测定应能评价树冠截留效应。

用相对生长法测定乔木层每一种植物枝、叶现存量鲜重, 用收割法测定单位面积灌木层每一种植物枝、叶现存量鲜重和草本层混合样品现存量鲜重^[14]. 分别采集乔木、灌木层植物小枝、叶和草本层枝叶混合样品 1 000~ 1 500g 称重, 并把称重后的样品平铺在沙网上, 一边翻动一边用喷雾器将样品充分湿透, 当网下不在滤出水时, 将样品称重, 按公式 (1)、(2) 计算枝、叶鲜重吸附水率和单位面积人工植被冠层吸附水量. 每一种植物枝、叶和每一林分草本层混合样品吸附水率分别做 3 个重复实验. 降雨时观察枝叶截留降雨过程。

某植物样品鲜重吸附水率(%) = (某植物鲜样品吸附水后重 - 植物鲜样品未吸附水时重) $\times 100$ / 植物鲜样品未吸附水时重 (1)

植物群落吸附水量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = $\sum$ 某植物乔木和灌木层枝现存量鲜重($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 该植物枝鲜重吸附水率(%) + $\sum$ 某植物乔木和灌木层叶现存量鲜重($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 该植物叶鲜重吸附水率(%) + 草本层混合样品鲜重($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 混合样品鲜重吸附水率(%) (2)

2.3 不同人工植被土壤入渗性能测定

在圣诞树、刺槐、墨西哥柏和旱冬瓜人工林内, 选择有代表性地段, 将每一地段划分成树下(树冠下小生境)、林隙(林中树冠未覆盖的部分)和对照(同一地段未栽植任何植物的空地, 利用时空互代法把空地当成治理前的现状) 3 类生境. 在 3 类生境上, 将环刀插入实验地 20cm 深, 刀口留有 5cm 高, 采用单环定水头逐次加水法测定不同时间的入渗速率, 结果取 3 个重复的平均值. 每次加入一定水头高度

的清水后, 记录入渗时间, 等连续 3 次入渗过程所花时间相同时, 表明已达试验地的稳渗速率, 观测结束, 按公式(3) 、(4) 计算入渗速率和增渗容量(不同生境稳渗速率相同条件下人工植被系统比对照增加的径流入渗量) .

入渗速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) = 入渗量(mm) / 时间(min)
(3)

增渗容量(mm) = 达到稳渗速率时树下或林隙地表累计入渗量(mm) - 达到稳渗速率时对照的累计入渗量(mm)
(4)

3 结果与讨论

3.1 不同人工植被地表径流、土壤侵蚀和氮磷流失特征

2001~ 2003 年 19 次产生径流的降雨过程, 2001 年有 6 次, 降雨量 99.2mm, 2002 年, 10 次, 降雨量 239.1mm, 2003 年观测了 3 次, 降雨量 114.8mm. 2001 和 2003 年降雨量与 2002 年比偏少. 通过比较发现, 在几种人工植被类型中, 尽管香根草是一种草本植物, 但形成的植被类型对地表径流、土壤侵蚀、氮磷流失控制效应最明显. 旱冬瓜和圣诞树植被类型控制地表径流、土壤侵蚀和各种形态的氮磷流失量较接近. 刺槐人工植被控制能力最

差(表 1) . 通过实验可得出 3 个结论: ①地表径流、土壤侵蚀、氮磷流失具有一致性. 通过 19 次观测结果分析, 地表径流量与 TP、TN、可溶性 TP 和可溶性 TN 流失量间相关系数为 0.9、0.99、0.82 和 0.81, 并处于极显著水平, 这一结论支持过去的研究工作^[2~ 6]. ②树高生长量大的人工植被, 面源污染物控制效应明显. 在几种木本植物人工植被中, 高度大的旱冬瓜和圣诞树林, 比高度小的刺槐林土壤及氮磷流失控制效果好. 根据本研究树冠截留和土壤入渗性能测定显示, 树高生长量大的人工植被, 冠层能吸附较多的降雨, 深的根系对土壤的作用, 能促进地表径流的入渗, 减轻径流对面源污染物溶解和输送作用. ③近地表草本植物和枯落物覆盖情况好的人工植被, 面源污染物控制效应明显. 在香根草小区, 草本植物覆盖很高, 雨滴几乎全部落在近地表的枝叶上, 雨滴携带的动能大部分被草本植物所消耗, 抑制了地表的溅蚀; 黏附于叶子上的雨水通过叶子滑落到地表, 由于叶子距地面距离小, 不会造成叶滴侵蚀; 草本植物密度大, 形成密实的生物带, 能截断地表径流, 拦截和滤过固体物质, 减少了径流中的泥沙携带量. 而圣诞树、刺槐和旱冬瓜人工植被, 由于植株高, 乔木层覆盖度大, 植物枝叶对降雨的截留效应虽然较强, 但吸附于枝叶上的雨水滴落时, 在覆盖

表 1 人工植被地表径流、土壤侵蚀和氮磷流失
Table 1 Runoff, soil erosion and leaching of total N and P, soluble total P and N on the surface of soil in manmade forests

人工植被类型	日期/ 年	产流降雨 / mm	地表径流 / $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	土壤侵蚀 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	TN / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	TP / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	可溶性 TN / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	可溶性 TP / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i> forest	2001	99.2	180.00	693.44	1.64	0.24		
	2002	239.1	499.00	2 840.24	5.36	0.98	1.81	0.09
	2003	114.8	16.00	23.20	0.06	0.03	0.01	< 0.01
	total		695.00	3 556.88	7.06	1.25	1.82	0.10
旱冬瓜林 <i>A. nepalensis</i> forest	2001	99.2	142.00	373.49	1.37	0.17		
	2002	239.1	459.00	1 606.57	4.80	0.83	1.62	0.09
	2003	114.8	21.00	20.04	0.03	0.02	0.01	< 0.01
	total		622.00	2 000.10	6.20	1.02	1.63	0.10
圣诞树林 <i>A. mearnsii</i> forest	2001	99.2	142.20	463.24	0.45	0.48		
	2002	239.1	429.00	1 744.98	4.52	0.94	2.03	0.10
	2003	114.8	27.00	51.93	0.08	0.03	0.02	< 0.01
	total		598.20	2 269.15	6.05	1.45	2.05	0.11
香根草对照 <i>V. zizanioides</i>	2001	99.2	153.50	429.22	0.92	0.31		
	2002	239.1	278.00	790.71	2.13	0.51	0.97	0.05
	2003	114.8	23.50	16.91	0.04	0.02	0.01	< 0.01
	total		455.00	1 236.84	4.10	0.85	0.98	0.06

低的地面产生了较重的叶滴侵蚀. 旱冬瓜由于是落叶乔木, 人工植被中枯落物较多地覆盖地表, 叶滴侵蚀相对较轻, 面源污染物流失也较少.

3.2 不同人工植被树冠截留效应及其与植物形态

特征间的关系

3.2.1 植物枝叶吸附水率与植物形态特征的关系

植物枝叶吸附水率因形态特征的差异而发生变化(表 2) . 吸附率高的植物是非革质化小叶植物, 吸

附水率在 60%~114% 之间, 其共同特征是叶子小, 叶子未角质化, 柔软, 重量轻, 叶子随小枝紧密排列. 通过降雨过程叶子吸附水观察, 降雨时, 叶子和雨水结合较牢固. 未角质化叶子容易和雨水结合, 降低了水在叶表面的流动性. 叶子随小枝紧密排列, 在叶子间还能再吸附雨水, 增强了树冠截留效应. 叶子本身重量轻, 使吸水叶子和未吸水叶之比大. 吸附率约在 50% 的是叶子较大的植物. 这组植物的特征是叶子大, 较重, 表面粗糙, 正面和背面常具表皮毛. 叶子大使截留面大, 但雨水是呈零散滴状分布于叶子上面, 每个雨滴都有雨水补给的相应叶面, 当水滴密度较大时, 易移动、合并和滴落; 叶子表面粗糙, 有表皮毛, 易附着雨水; 叶子较重, 吸附叶和未吸附叶之比小. 吸附水最低的植物是刺槐和云南松. 其特点是: 叶子表面无表皮毛, 叶子光滑, 角质层较厚, 接雨面积小. 特别是雨滴与云南松针叶结合, 雨滴容易滑落, 吸附率较低. 枝吸附水的特点, 一般表面呈中等粗糙, 不分泌脂类物质的枝, 吸附率较高. 中等粗糙程度的枝表面凹陷部分和突出部分在短时间内能吸附较多水分, 而粗糙的枝在短时间内凹陷部分水分不容易进入, 影响了吸附量. 表面光滑的枝, 因吸附表面积小,

吸附率也低. 草本层混合样品吸附水率, 刺槐林和圣诞树林的吸附率较高, 而旱冬瓜林和墨西哥柏林的吸附率较低, 这可能与植物种类组成差异有关. 如果组成中高吸附水率植物较多, 吸附率就高.

3.2.2 不同人工植被冠层吸附水总量

人工植被吸附水量以圣诞树林最高, 达到 $16\,084.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 1.61 mm 降雨, 其次是旱冬瓜林, $10\,760.02\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 1.08 mm 降雨, 条带种植的香根草吸附水量为 $8\,700.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 0.87 mm 降雨, 刺槐林和墨西哥柏林相对较少, 吸附水量为 $4\,739.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $4\,432.24\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 0.47 和 0.44 mm 降雨, 荒台地对照最小, 为 $1\,050\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 0.11 mm 降雨(表 3). 墨西哥柏的枝叶吸附水率较高(表 2), 但由于人工植被生长慢, 地上部分现存量小, 整个冠层吸附水总量较小. 通过吸附水测定的树冠截留效应研究表明, 阔叶林的树冠截留效应比针叶林要强, 香根草截留效应比刺槐林和墨西哥柏林要好. 这一结论和用螺旋槽沟技术研究森林群落树冠截留结果是一致的^[12, 13].

3.3 不同人工植被对土壤入渗性能的效应

表 2 人工植被中植物枝叶鲜重吸附水率

Table 2 The ratio of the hygroscopic volume to aboveground fresh standing crops of leaves and branch of plants in different manmade forests

乔木和灌木植物种	吸附水率/%		草本层植物	枝叶混合样品 吸附水率/%
	叶	枝		
老鸦炮 <i>V. fragile</i>	114.62	41.09	香根草丛 <i>V. zizanioides clump</i>	65.41
黄泡 <i>R. obcordatus</i>	76.95	21.65	刺槐林 <i>R. pseudoacacia forest</i>	55.12
小铁子 <i>M. africana</i>	66.17	16.02	圣诞树林 <i>A. mearnsii forest</i>	50.90
墨西哥柏 <i>C. lusitanica</i>	63.6	10.00	旱冬瓜林 <i>A. nepalensis forest</i>	28.83
滇青冈 <i>C. glaucoides</i>	51.98	18.73	墨西哥柏林 <i>C. lusitanica forest</i>	29.31
棠梨 <i>P. pashia</i>	51.70	15.97		
卵叶南烛 <i>L. doyonensis</i>	50.71	20.52		
旱冬瓜 <i>A. nepalensis</i>	50.00	3.00		
圣诞树 <i>A. mearnsii</i>	46.60	4.32		
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	20.00	11.10		
云南松 <i>P. yunnanensis</i>	17.08	21.42		

3.3.1 不同人工植被生境土壤渗透特征

在 4 种人工植被中, 与对照相比, 圣诞树林和旱冬瓜林树下和林隙土壤初渗速率较大, 分别为 1.76 、 $1.42\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 0.81 、 $0.79\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 是对照 1.04 、 $0.32\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 1.69 、 1.37 倍和 2.53 、 2.45 倍; 而刺槐林和墨西哥柏林则变化不大, 表明圣诞树和旱冬瓜人工植被能显著影响荒台地初渗速率(表 4). 4 种人工植被树下和林隙土壤稳渗速率除了旱冬瓜林与对照相比有一定差异外, 其余人工植被所测数值与对照相比, 变化不大, 表明 3 年的

生态恢复措施对土壤稳渗速率影响小. 4 种人工植被土壤增渗容量按大到小顺序排列, 树下: 旱冬瓜林 > 圣诞树林 > 刺槐林 > 墨西哥柏林; 林隙: 旱冬瓜林 > 圣诞树林 > 墨西哥柏林 > 刺槐林. 这一结果表明, 生态恢复工程显著地增加了土壤水库容量, 树高生长量大的人工植被, 增渗容量变化更显著, 这可能与根-土相互作用, 根系-土壤间形成较大的间隙, 产生了径流入渗的边缘效应有关. 人工植被中, 树下和林隙土壤的渗透速率是不同的, 树下一般大于林隙, 说明人工植被中生境差异影响着土壤渗透速率. 在树

下,由于造林前整地对土壤的翻动、乔木根系生长对土壤的机械作用可能显著改善了土壤物理性质,并作用于较深的土层,而在林隙,草本植物和灌木对土壤物理性质的作用可能较强,但作用于较浅的土层,使 2 种生境入渗性能具有差异。

3.3.2 不同人工植被生境土壤入渗过程

表 3 人工植被冠层吸附水总量

Table 3 The hygroscopic volume of the canopy of different manmade forests

人工植被类型	人工植被冠层吸附水			
	木本植物层/kg·hm ⁻²	草本层/kg·hm ⁻²	小计/kg·hm ⁻²	折成降雨量/mm
刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i> forest	39.22	4 700.00	4 739.22	0.47
旱冬瓜林 <i>A. nepalensis</i> forest	7 660.02	3 100.00	10 760.02	1.08
圣诞树林 <i>A. mearnsii</i> forest	12 484.85	3 600.00	16 084.85	1.61
墨西哥柏林 <i>C. lusitanica</i> forest	432.24	4 000.00	4 432.24	0.44
香根草 <i>V. zizanioides</i> clump		8 700.00	8 700.00	0.87
对照 Controls		1 050.00	1 050.00	0.11

表 4 各人工植被不同生境土壤入渗参数

Table 4 The hydrological parameter of the soil in different habits in manmade forest stands

人工植被类型		初渗速率/mm·min ⁻¹			稳渗速率/mm·min ⁻¹			增渗容量/mm	
		树下	林隙	对照	树下	林隙	对照	树下	林隙
圣诞树林	T ¹⁾	1.76	1.42	1.04	0.07	0.07	0.08	0.98	0.65
<i>A. mearnsii</i> forest		1.69	1.37	1.00	0.88	0.92	1.00		
刺槐林	T	1.65	1.60	1.60	0.07	0.07	0.07	0.26	0
<i>R. pseudoacacia</i> forest		1.03	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00		
旱冬瓜林	T	0.81	0.79	0.32	0.05	0.04	0.01	2.28	1.79
<i>A. nepalensis</i> forest		2.53	2.45	1.00	5.00	3.51	1.00		
墨西哥柏林	T	0.34	0.33	0.33	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04
<i>C. lusitanica</i> forest		1.03	0.99	1.00	1.00	1.55	1.00		

1) T: 不同生境渗透速率与对照渗透速率之比 (the ratio of the soil infiltration rate of different habits to one of controls in forest stands)

各人工植被树下、林隙和对照土壤累计渗透量与渗透时间的关系呈对数函数关系(图 1),其通式为: $y = a \ln(x) + b$. 式中, y : 累计下渗量; x : 入渗时间; a 和 b : 常数. 在 4 种人工植被中, 圣诞树林和旱冬瓜林树下、林隙和对照累积渗透量随时间差异比较大, 而刺槐林和墨西哥柏林差异比较小, 生境间径流累积渗透量累积曲线几乎重叠. 这一结果说明在滇池流域, 圣诞树和旱冬瓜是控制地表径流的好树种, 而刺槐和墨西哥柏比较差, 这和北方地区刺槐能显著增加径流入渗有很大的差异, 这可能是刺槐在云南中部生长较差有关^[15].

4 结论

(1) 在人工植被中, 香根草生物带对地表径流、土壤侵蚀、氮磷流失控制效果最显著, 旱冬瓜和圣诞树林次之, 刺槐林最差. 土壤侵蚀、TN、TP、可溶性 TP、可溶性 TN 的流失量与地表径流呈显著正相关, 有效对地表径流过程进行调控, 减少地表径流溶解和向保护水体输送土壤及氮磷是荒台面源污染控制的关键环节. 高度生长量大、近地表草本植物和枯落物覆盖情况好的人工植被, 面源污染物控制效果

明显.

(2) 具良好树冠截留和土壤入渗效应的人工植被, 能对降雨和径流过程进行空间调节, 减少地表径流, 增强氮磷及水土流失控制. 植物枝叶形态特征和生物量直接影响着树冠截留效应. 而叶子未角质化、柔软、随小枝紧密排列、叶面粗糙、有表皮毛、叶子含水量低, 枝表面中等粗糙、不分泌脂类物质, 能较快增加地上部分现存量的植物学特征, 能增强人工植被树冠截留效应. 人工植被树高生长量大, 能形成较深的根系, 造林前工程整地, 林间灌木和草本恢复较好, 能显著增加径流下渗和土壤水库容量.

(3) 荒台地人工植被系统氮磷及水土流失控制的最优植被结构应该具有: ①物种组成上, 拥有较多叶子未角质化、柔软、随小枝紧密排列、叶面粗糙、有表皮毛、叶子含水量低、枝表面中等粗糙、不分泌脂类物质、能较快增加地上部分现存量的植物种. ②在垂直层次上, 应具有多层结构特征. 乔木层能提高树冠截留能力, 较深的根系可增强径流入渗的根-土边缘效应, 提高土壤水库容量. 灌木层和草本层增加地表覆盖, 减轻叶滴侵蚀, 充分发挥乔灌木各层的生态系统功能.

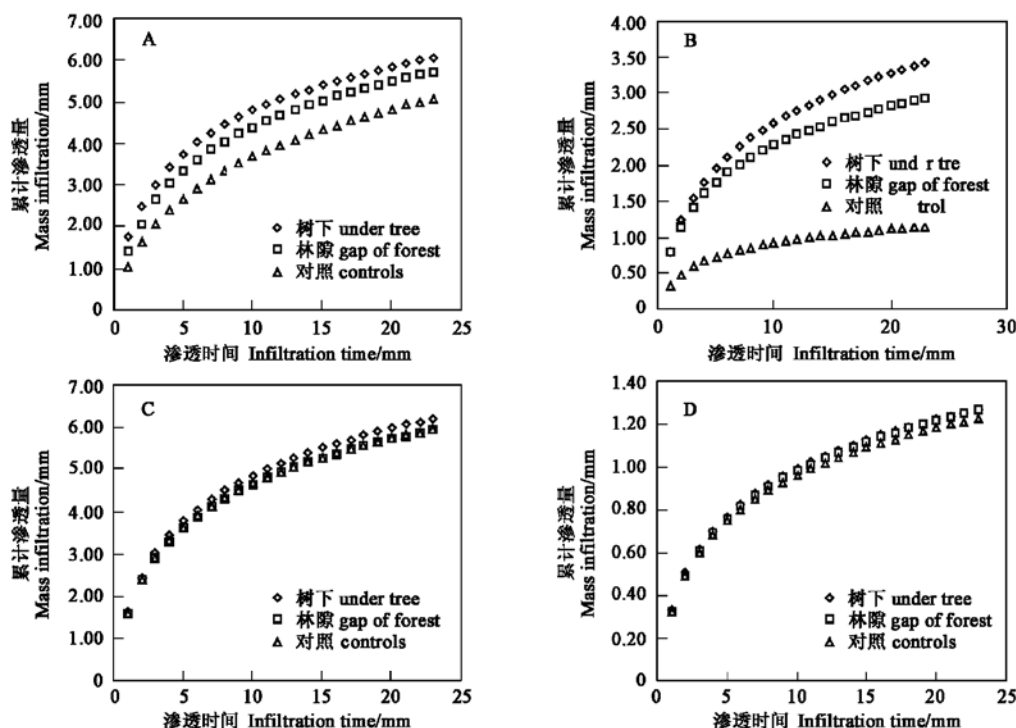


图 1 4 种人工植被不同生境土壤入渗过程(A. 圣诞树林; B. 旱冬瓜林; C. 刺槐林; D. 墨西哥柏林)

Fig. 1 Soil infiltration process of different habits in four manmade forests (A: *A. mearnsii* forest;

B: *A. nepalensis* forest; C: *R. pseudoacacia* forest; D: *C. lusitanica* forest)

(4) 植物枝叶吸附水测定, 是评价植物截留效应的简单方法. 通过这种方法的应用, 可选择良好树冠截留的植物种, 并经过适当的物种配置, 培育出面源污染物控制能力强的人工植被系统.

参考文献:

- [1] 杨树华, 贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1998. 54~ 68.
- [2] Sharpley A N, Withers P J A. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus [J]. *Fert. Res.*, 1994, **39**: 133~ 146.
- [3] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21** (1): 9~ 12.
- [4] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. *环境科学学报*, 2001, **21** (3): 344~ 348.
- [5] 郭廷辅, 段巧辅. 径流调控理论是水土保持的精髓. <http://www.swcc.org.cn/swest/forum/20023.14~2.htm>
- [6] 杨京平, 卢剑波. 生态恢复工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 51~ 68.
- [7] Wang zhenhong, Duan changqun, Chenming, et al. Ecological Hydrological Characteristics of the Three Manmade Forest

Communities in the Central Yunnan Province [A]. *Proceedings of 12th International Soil Conservation Organization Conference* [C]. *Process of Soil Erosion and Its Environmental Effect*, 2002, **2**: 541~ 550.

- [8] 陈奇伯, 王克勤, 齐实, 等. 黄土丘陵坡耕地水土流失与土地生产力的关系[J]. *生态学报*, 2003, **23** (8): 1463~ 1469.
- [9] 王礼先, 余新晓. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999. 251~ 308.
- [10] 王震洪, 段昌群. 滇中几种人工植被生态系统恢复效应研究[J]. *应用生态学报*, 2003, **14** (6): 45~ 50.
- [11] 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能规律研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996. 1~ 15.
- [12] 刘世荣. 森林生态系统水文生态功能总论——全球水文循环、水资源及其危机[A]. 见: 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能规律研究[C]. 北京: 中国林业出版社, 1996. 16~ 22.
- [13] 王震洪, 陈明, 等. 云南中部三种典型人工植被生态系统水文生态规律研究[J]. *水土保持学报*, 2003, **17** (1): 148~ 151.
- [14] 冯宗炜, 吴刚, 王效科. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 100~ 120.
- [15] 胡振琪, 张光灿, 毕银丽, 等. 煤矸石山刺槐人工植被生产力及生态效应研究[J]. *生态学报*, 2002, **22** (5): 621~ 628.