太湖防护林建设的生态效应

吴 灏[1], 张建锋[1], 单奇华[1], 陈光才[2]

(1. 中国林科院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 宜兴市农林局, 江苏 宜兴 214206)

摘 要: [目的] 开展太湖湖滨防护林建设对区域生态改善效应研究,为今后太湖防护林建设及生态效益改善提供技术支持。[方法] 选择太湖宜兴地区太湖湖滨防护林,分别探讨防护林地和农田中土壤状况、植物多样性变化和地表径流特征,分析不同林地土壤性质差异及相应的生物多样性变化。[结果] 通过湖滨防护林的建设能有效改善土壤渗透性,增强土壤持水能力,减少地表径流,增加植物物种多样性。[结论] 湖滨防护林建设能改善土壤状况,有效改善区域环境,有助于保护生物多样性,是太湖环境综合治理中切实有效的生态措施。

关键词: 太湖; 地表径流; 植物多样性; 防护林; 生态效益

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2016)01-0219-05 **中图分类号**: S727.2

文献参数: 吴灏, 张建锋, 单奇华,等. 太湖防护林建设的生态效应[J]. 水土保持通报,2016,36(1):219-223. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.039

Ecological Effects of Shelter Forests Construction of Taihu Lake Levee

WU Hao[1], ZHANG Jianfeng[1], SHAN Qihua[2], CHEN Guangcai[1]

(1. *Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang* 311400, *China*; 2. *Department of Agriculture & Forestry of Yixing City, Yixing, Jiangsu* 214206, *China*)

Abstract: [Objective] By studying the ecological effects of shelter forest construction of Taihu Lake levee, we aimed to provide technical support for future shelter belts construction and environmental improvement in this region. [Methods] The shelter forested lands and farmlands at Yixing City were chosen as the test plots. Field survey was conducted and soil samples were collected. Soil conditions, plant diversity and surface runoff was investigated to analyze the heterogeneity of soil properties and biodiversity. [Results] The results showed that, with the construction of the ecological shelter forests, soil permeability was improved, surface runoff was reduced and plant species diversity was enhanced. [Conclusion] The construction of ecological shelter forests can improve the regional environment, enhance soil status, and increase biodiversity in Taihu basin, and is the effective ecological measure for the environment comprehensive treatment in Taihu Lakebasin.

Keywords: **Taihu; surface runoff; plant diversity; shelt forest; ecological effect**

太湖地处长江三角洲南缘,是中国 5 大淡水湖之一[1]。太湖流域是中国重要的经济核心区[2],也是中国社会经济最发达的地区之一[3]。近几年太湖流域经济快速发展、人口迅速增加[4]。在太湖流域经济快速发展的背景下,忽略了环境问题,湖泊围垦导致湖区面积不断减少,湖泊流域植被覆盖大面积萎缩[5]。太湖流域沟渠密布,污染物会经过土壤渗透进入水体[6]。2007 年 5 月无锡蓝藻水华引起饮用水危机,环境问题更加凸显在人们眼前[7-8]。对于太湖流域存在的环境问题,无论是地方还是中央都对太湖水环境治理给与了极大关注,出台了太湖水污染防治"九五计划"、太湖流域水环境综合治理总体方案等一系列措施[9-10],针对湖泊流域治理采取控制源头、截留污染物、生态修复等多种手段全面系统治理[11-12]。防护林建设是一种有效的生物措施。生态防护林体系具有去除氮磷作用[13],减轻农田氮素面源污染[14];增加水源涵养林面积能有效提高入湖河流水质,改善太湖富营养化状况[15]。

从 2008 年开始采用具有水源涵养作用的乡土落叶树种营建沿太湖防护林,2008 年完成沿太湖40 km

收稿日期:2014-12-27 **修回日期**:2015-01-14

资助项目:国家科技支撑项目"村镇景观建设中的生物多样性保护技术"(2012BAJ24B0504); 林业公益性行业科研专项(201104055); 中央级公益性科研院所基金重点项目(RISF2013001)

第一作者:吴灏(1989—),男(汉族),安徽省金寨县人,硕士,研究方向为乡村景观建设中生物多样性保护。E-mail:wuh515@126.com。

通讯作者:张建锋(1966—),男(汉族),山东省东阿县人,博士,研究员,主要从事人居生态和盐碱地生态修复研究。E-mail:zhangk126@126.com。

长 200 m 宽的太湖景观防护林建设，面积为 8 km^2；2009 年利用银杏(*Ginkgo biloba*)、喜树(*Camptotheca acuminate*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)等树种进行带状或块状混交造林，并完成建设 1 km 地区太湖景观防护林建设，造林面积 20 km^2。利用上述品种，2010 年重点进行大四旁造林，完成 5 km 地区，面积造林达到 12 km^2。到 2010 年末，宜兴新增林地 56.67 km^2，其中太湖景观防护林 40 km^2，经济林(包括能源林)13.33 km^2，用材林 3.33 km^2，森林覆盖率增加 2.78%，达到 31.38%，村庄绿化覆盖率为 38%。

如此大面积的造林，对于太湖水环境的改善效果如何？各级政府和湖区群众十分关心，也是一个重要的科学问题。为此，我们拟开展相关的调查，以期为太湖防护林建设及生态效益改善提供技术支持。

1 试验地概况

试验地设置在江苏省宜兴市，位于江苏南部，太湖西岸，北纬 31°29′28.97″—31°18′42″，东经 120°1′33″—119°55′55″，总面积 1 996.6 km^2，境内太湖水域面积 242.29 km^2。宜兴南部多为丘陵山地，北部多为平原圩区，呈南高北低的走势，可划分为低山、丘陵、平原 3 大地貌单元。属于北亚热带季风气候区，季节鲜明，日照充足，无霜期长，年平均气温 16.5 ℃，日照 1 761.1 h，年均降水量 1 264.1 mm。宜兴地区平原、圩区以水稻土为主，太湖渎区以湖成白土和夜潮土为主，丘陵山区以黄棕壤、红壤为主。自然植被类型以北亚热带常绿落中阔混交林为常绿落叶阔叶混交林为主，全市林木覆盖率 28.03%。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集与测定

分别在乌溪港、大浦港、烧香港和百渎港附近农田中设点，采集土壤样品。在每个样点以蛇形布点法，按照随机、等量和多点(10 点)混合的原则采集表层(0—20 cm)土壤样品，每样点设 3 次重复(3 个土壤样品/点)。用环刀取土，测定土壤容重、孔隙度和持水量[16-18]。土壤样品在实验室自然风干，剔除细根，研磨并分别过尼龙筛(孔径：2 cm，1 cm 和 0.25 cm)备用。

土壤样品测定方法：pH 值用 25 ml 去离子水浸提过 2 mm 筛的风干土壤样品(10 g)，pH 计法；机械组成用过 2 mm 筛土样，比重计法；有机质(organic matter，OM)用重铬酸钾氧化—外加热法；全氮(total nitrogen，TN)用半微量凯氏法；全磷(total phosphorus，TP)用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法；有效磷(available phosphorus，AP)用碳酸氢钠浸提钼蓝比色法；全钾用氢氟酸—高氯酸消煮—火焰光度法；有效钾(available potassium，AK)用 1 mol/L 乙酸铵浸提—火焰光度法[16]；微生物生物量(microbial biomass，BM)用氯仿熏蒸培养法[19]。用标准土样〔GBW07 403(GSS-3)〕校准化学指标的测定值，标准土样购自国家标准物质中心。

2.2 植被覆盖和植物多样性调查

将研究区域分为林地和农田，用目测法对防护林带和邻近农田内所有出现的野生草本植物种类进行调查，并进行分类统计；观测防护林带与农田植物的群落分布和结构组成，研究区域草本植物群落物种种类组成。调查时间为 2009 年 10 月和 2010 年 5 月。

2.3 地表径流测定

在研究区，将土地类型分为防护林和农田，分别在防护林和农田用环刀法取土，室内测定土壤持水量和总孔隙度指标，同时，挖掘土壤剖面，采集土壤样品，室内用比重计法测定土壤机械组成，每条港河、每种土地类型设 3 个重复。地表植物覆盖率用实地测量法估算[20]。地表径流用曲线数值法(curve number method，CN)估算，计算方法：

$$Q=\frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \tag{1}$$

式中：Q——实际径流量(mm)；P——降雨量(mm)；S——最大可能滞留量(入渗量，mm)。下同。

$$S=\frac{25400}{CN}-254 \tag{2}$$

式中：CN 是一个反映降雨前流域特征的无量纲综合参数。

根据 CN 值表，结合研究区土地利用和土壤分类情况，参考国内其他研究成果，可确定研究区的 CN 值。CN 值越大，S 值越小，Q 值越大，越易产生径流。地表径流深(Q，mm)与区域地表面积(Area，mm^2)的乘积为区域地表径流量(V，mm^3)。

3 结果与分析

3.1 研究区土壤状况

质地是土壤的一项稳定指标，对土壤容重、孔隙度和含水量等结构性指标有重要影响，对土壤通气性、透水性和肥力水平等功能亦有重要的影响。研究区土壤质地类型为砂土，土壤机械组成比例分别为砂粒 89.26%，粉粒 3.31%，黏粒 7.43%，土壤以粉细砂和砂质泥等颗粒物质为主。砂粒占绝大多数，不利于土壤保水保肥。

土壤的容重、孔隙度和通气度直接体现土壤的松紧度、结构性和通气透水的能力。研究结果表明(表1):研究区土壤容重平均为 1.25±0.16 g/cm^3,变异系数为 12.8%,土壤容重适宜植物生长。总孔隙度平均为 41.18%±0.05,变异系数为 12.2%;毛管孔隙度平均为 33.91%±0.05,变异系数为 14.71%;非毛管孔隙度平均为 7.72%±0.02,变异系数为 25.91%;总孔隙度和非毛管孔隙度均偏小,毛管孔隙度适中,这与该地区土壤机械组成以砂粒为主的研究结果相符。

田间持水量是土壤的一项物理性质,是植物有效水的上限,它的大小与土壤的结构、质地、有机质含量以及土地利用状况有关。研究区(表 1)田间持水量平均为 27.45%±0.05,高于砂土田间持水量的平均水平,土壤持水能力较强,表明研究区土壤颗粒与有机物质有机结合,土壤结构性良好。

表 1　太湖防护林区土壤主要物理性状

统计量	容重/(g·cm^{-3})	最大持水量/%	毛管持水量/%	最小持水量/%	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
最小值	1.05	27.45	23.02	20.49	32.24	25.55	5.59
最大值	1.48	45.18	36.36	33.61	47.66	39.11	10.08
平均值	1.25	33.36	27.45	25.13	41.18	33.91	7.27
标准差	0.16	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02

土壤酸碱性是土壤重要的化学性质,是成土条件、理化性质、肥力特征的综合反映,也是划分土壤类型、评价土壤肥力的重要指标。研究区土壤 pH 值平均为 5.95±0.63,变异系数 10.59%,土壤偏酸性(表2)。根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准,研究区土壤有机质、全氮、全磷含量属于中等水平,有效磷为极高水平,有效钾为偏高水平(表 2,3)。通常土壤中全钾含量丰富,研究区土壤全钾含量为高水平。研究区土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾的空间变异系数分别为 37.33%,38.2%,43.5%,92.16%,50.81%和 105.33%,表明研究区土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量空间分布不均,而有效磷和有效钾空间分布极不均匀。数据分析显示有效磷和有效钾出现个别点的极端高值,分别达 207 和 406 mg/kg,最高值是最低值的 30 和 17 倍左右,远高于有机质、全氮、全磷和全钾的极值倍数(均为 4 倍左右),人为施肥可能是导致养分空间分布不均和极端高值的主要原因。土壤微生物生物量较高,平均值为 206.83±135.28。表明研究区土壤微生物数量丰富,潜在活性较高。

表 2　太湖防护林区土壤化学特性

统计量	pH 值	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
最小值	4.94	6.50	0.57	0.34	6.83	3.37	23.00
最大值	7.22	30.90	2.33	1.52	207.00	15.40	406.00
平均值	5.95	19.93	1.34	0.74	63.35	6.03	79.87
标准差	0.63	7.44	0.51	0.32	58.38	3.06	84.13

表 3　土壤养分分级标准

等 级	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
极 低	<6	<0.5	<0.2	<3	<30
低	6～10	0.5～0.75	0.2～0.4	3～5	30～50
中偏低	10～20	0.75～1	0.4～0.6	5～10	50～100
中偏高	20～30	1～1.5	0.6～0.8	10～20	100～150
高	30～40	1.5～2	0.8～1	20～40	150～200
极 高	>40	>2	>1	>40	>200

3.2　防护林带对生物多样性的影响

通过对研究区域内农田和防护林地的植物调查,结果显示共出现草本植物 64 种,隶属于 21 科 55 属,禾本科和菊科植物种类最多,禾本科常见的植物种类为野燕麦(*Avena fatua*)、狗尾草(*Setaira viridis*)、稗(*Echinochloa crusgalli*)、看麦娘(*Alopecurus ae-*

qualis)、牛筋草(*Eleusine indica*)等共17种,菊科常见的植物有小蓬草(*Conyza canadensis*)、一枝黄花(*Solidago decurrens*)、艾叶(*Artemisia lavandulaefolia*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)等共17种,两科植物占总植物种类的53.13%,组成了草本植物的绝大部分,其他种类为蓼科6种,藜科和唇形科各3种,豆科和苋科各2种,其他科各1种(表4)。

表4 调查区域植物组成

科	属	种	科	属	种	科	属	种
禾本科	16	17	车前科	1	1	牛儿苗科	1	1
菊科	15	17	大戟科	1	1	茄科	1	1
蓼科	3	6	大麻科	1	1	茜草科	1	1
藜科	1	3	马鞭草科	1	1	石竹科	1	1
唇形科	3	3	毛茛科	1	1	玄参科	1	1
豆科	1	2	十字花科	1	1	酢浆草科	1	1
苋科	2	2	蔷薇科	1	1	旋花科	1	1

防护林带内野生草本植物种类较齐全,群落结构向多样化、复杂化趋势发展,生物多样性较农田显著提高。林带内遮阴区域和光照区域草本植物群落结构差异明显,在遮阴区域内为以耐荫草本植物(小蓬草、一年蓬、三叶草和艾草)为绝对优势种,呈斑块状分布在防护林带内遮荫区域;在林窗、林缘和林带外侧等光照充足区域,小蓬草、三叶草、鹅观草和看麦娘为优势物种,群落结构为多物种混交。在农田环境中,草本植物不存在分布均匀的片状群落结构,常见的草本物种为野老鹳、稗草和波斯婆婆纳等,没有优势种,只在路边或沟边线状或点状零星分布着一些草本植物,且种类和数量均较少。防护林为植物的生存提供了适宜的多样性生境条件,草本植物种类丰富,生物多样性高,农田生境中由于物理刈割或施用除草剂的传统农耕措施,草本植物种类相对稀少,防护林带有效地改良了区域小生境,显著提高了物种多样性。

3.3 防护林带对地表径流的影响

研究防护林地周围不同土地的地表径流。采用曲线数值法测定不同土地利用方式下土壤透水性,结果显示16类土地利用方式下土壤透水性差异较大,空地、荒地土壤的透水性CN值较低,街道和道路相应值最高,高覆盖林地和草地土壤透水性较低。不同土壤类型和土地利用方式的CN值如表5所示。

表5 等湿润状态下不同土壤类型和土地利用方式的CN值(前期土壤含水为平均状态)

土地利用方式	土壤透水性			
	A	B	C	D
空地、荒地(草的覆盖率>75%)	39	61	74	80
空地、荒地(草的覆盖率50%~75%)	49	69	79	84
荒地(裸地)	76	85	94	100
耕地(没有水保措施)	72	81	88	91
耕地(有水保措施)	62	71	78	81
牧场或山地(穷瘠状态)	68	79	86	89
牧场或山地(肥沃状态)	39	61	74	80
草地(覆盖度>75%)	39	61	74	80
草地(覆盖度50%~75%)	49	69	79	84
草地(覆盖度<50%)	68	79	86	89
林地(稀疏)	45	66	77	83
林地(中密度)	36	60	75	80
林地(高密度)	25	55	70	77
街道和道路(泥地)	72	82	87	89
街道和道路(石头铺砌)	98	98	98	98
街道和道路(水泥地)	100	100	100	100

注:A为透水如砂土;B为较透水如砂壤土和轻壤土;C为透水性不好如中壤土;D为接近不透水如水泥、石块封闭地面。

研究区防护林和农田土壤的物理属性如最大持水量、毛管持水量、总孔隙度、颗粒含量等指标没有显著差异。机械组成分析表明,防护林与农田土壤兼为砂土,土壤渗透性较好。

不同的土地利用类型土壤物理属性有差异,研究防护林与农田土地利用下土壤的基本物理属性,从最大持水量、毛管持水、总孔隙度、砂粒和黏粒方面比较两种土地利用下土壤基本物理属性变化,结果显示土壤属性的各项值均有变化,其中毛管持水和总孔隙度值的差异较大,砂粒值变化较小,土地利用方式的变化带来了土壤基本物理属性的改变,防护林的建设对土壤的总孔隙度、砂粒和黏粒组成有所改变(表6)。

表6 不同利用类型土壤基本物理属性 %

土壤属性		最大持水量	毛管持水量	总孔隙度	砂粒	粉粒	黏粒
防护林	平均值	32.55	26.54	42.09	89.41	3.04	7.55
	标准差	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
农田	平均值	33.63	28.18	38.50	88.97	3.86	7.17
	标准差	0.06	0.07	0.09	0.01	0.01	0.01

分析降雨后地表径流量,以年平均降雨量(1 205.3 mm)、土壤质地(砂土)、林地(中密度)、草地(覆盖度>75%)和耕地(没有水保措施)为依据,运用曲线数值法(CN),分别计算防护林和农田年地表

径流深值。查表得研究区防护林和农田土壤的 CN 值为 36 和 72,带入公式(2)得防护林和农田土壤的最大可能滞留量(S)分别为 451.56,98.78,将 S 和降雨量(p)代入公式(1)得防护林和农田的地表径流深(Q)分别为 793.59 和 1 094.36 mm,占年平均降雨量分别为 65.84%和 90.8%,农田地表径流量显著高于防护林地表径流量,升高率达 38%。表明防护林对控制地表径流,减少水土流失和养分运移有着显著的作用。

4　结论与讨论

防护林地建设前的土地利用类型为农田,研究农田中土壤状况,结果显示研究区土壤为砂土,容重平均为 1.25±0.16 g/cm^3,总孔隙度和非毛管孔隙度均偏小,毛管孔隙度适中,土壤物理属性适宜植物生长。土壤田间持水量高,土壤颗粒与有机物质有机结合,土壤结构性良好,持水能力较强。土壤偏酸性,有机质、全氮和全磷含量属于中等水平,有效钾含量为偏高水平,全钾含量为高水平,有效磷为极高水平,养分空间分布不均。土壤微生物数量丰富,潜在活性较高。土壤的整体属性表明适宜植物生长,为进行生态防护林建设提供了先决条件,土壤中有效钾、全钾含量均处于较高水平,而防护林植物的生长能吸收高含量水平的元素,起到减源增汇的作用。营建水岸防护林,增加植被群落覆盖,能有效吸附和减弱流域的面源污染[21]。

防护林中草本植物种类丰富,共记录到草本植物 21 科 64 种,其中禾本科和菊科植物物种组成优势明显,两个植物种类均达到 17 种,农田中优势群落不明显,而防护林中优势植物组成明显,形成了以小蓬草、艾草、一年蓬为优势种的植物群落。农田中存在物理刈割或施用除草剂的传统农耕措施,农田草本植物分布零散,没有优势种,不存在群落结构;防护林带内物种丰富,群落结构正逐步恢复和优化,在遮荫区域,群落结构以耐荫草本植物(小蓬草、一年蓬、三叶草和艾草)为绝对优势种,呈斑块状分布在防护林带内遮荫区域,其他物种为伴生种;在林窗、林缘和林带外侧等光照充足区域,群落结构为多物种混交。防护林带有效地改良了区域小生境,显著提高了物种多样性。

降雨到达地面后,如不能全部下渗到土壤,就会形成地表径流,径流溶解大量可溶性营养物质,进入水体形成污染物[22]。防护林中土地地表径流显著低于农田地表径流,防护林的建设能有效降低土壤地表径流,减少水土中污染物的进入,增加土壤肥力[23]。土壤的机械组成是一项稳定性指标,在人类时间尺度上自身演化、发育几乎不变,而用人为干预的办法改良土壤质地,增加渗透性的做法工程量大,成本高,从生态学角度来讲不具可行性,因此,唯有采取植物措施,最大限度地提高土壤渗透性,降低地表径流量是可行之策。本项目在研究区主要入湖河道两侧 50 m 区域,营造了生态防护林以改良土壤结构,降低地表径流和土壤养分负荷。防护林人工结构为乔木为主,搭配灌木,采用中密度造林,乔木株行距为 3 m×3 m,灌木株行距为 1 m×1 m;造林后封育,一年后防护林野生草本植物群落结构逐步恢复和优化,物种多样性显著提高,运用实地测量法计算防护林草地覆盖率,除道路外,防护林内地表几乎全被野生草本覆盖,覆盖率超过 95%,防护林邻近农田地被覆盖率较低,年平均维持在 50%左右,且无水土保持措施,地表径流量大,生物多样性低。由此可见,营建防护林是一项低成本、高效的生态修复技术,能改善土壤状况,减少地表径流,改善局部小环境,增加物种多样性,对于流域的环境治理具有积极的作用。

总之,通过防护林建设,有利于改善土壤环境。研究区域土壤结构为砂土类型,主要成分是砂粒,不利于保水保肥。水土流失是加剧水土污染的因素,增加植物覆盖,提高林分结构稳定性能有效减少水土流失。通过草地和农作物覆盖,保持水土效果也很好。增加林地覆盖,营造乔木层、灌木层和草本层多层次林分结构,能不同程度截留降雨,减少对地表的冲刷作用,更好地保持水土。同时,提高植被覆盖率有助于提高土壤有机质,增加植物绿肥;少量勤施肥,有利于改善土壤肥力状况。概括地说,在太湖流域,增加森林植被覆盖,有利于提高植物多样性,能够有效改善太湖沿岸的生态环境,保护水质安全。

[参 考 文 献]

[1] 张少兵,王雅鹏. 太湖流域集约农业的环境影响分析[J]. 环境保护,2008,382(20):29-31.

[2] 靳晓莉,高俊峰,赵广举. 太湖流域近 20 年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(3):298-302.

[3] 刘兆德,虞孝感,王志宪,等. 太湖流域水环境污染现状与治理的新建议[J]. 自然资源学报,2003,18(4):467-474.

[4] 孔繁翔,胡维平,范成新,等. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考[J]. 湖泊科学,2006,18(3):193-198.

[5] 胡开明,李冰,王水,等. 太湖流域(江苏省)水质污染空间特征[J]. 湖泊科学,2014,26(2):200-206.

[6] 万寅婧,王文林,周锋,等. 太湖流域典型地区农村生活污水中污染物在表层土壤中的削减特征与测算[J]. 生态与农村环境学报,2013, 29(6):796-803.

(下转第 229 页)

[7] 野久田稔,李晓华. 由根系抗拉强度推算其固坡效果[J]. 水土保持科技情报,1997(1):25-28.
[8] 李铁军,李晓华. 植被固坡机制的研究[J]. 水土保持科技情报,2004(2):1-3.
[9] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京:科学出版社,2008:106-134.
[10] 杨璞. 根土复合体极限载荷的数值计算方法和试验研究[D]. 北京:清华大学,2008:62-100.
[11] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2010:40-59.
[12] 张超波. 林木根系固土护坡力学基础研究[D]. 北京:北京林业大学,2011:69-88.
[13] 及金楠. 林分根系空间分布与水平阶整地对土质坡面稳定性的影响[D]. 北京:北京林业大学,2011:51-68.
[14] 赵彩霞,郑大玮,何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. 植物生态学报,2005,29(1):68-73.
[15] 黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报,2001,56(6):700-710.
[16] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Spaan W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989,44(4):347-349.
[17] 王树力,刘玉山. 赤峰市流动沙地植物沙障治理模式的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):144-147.
[18] 杨朝东,张霞,万勇,等. 获草根系统扩展能力和固土作用的研究[J]. 长江大学学报,2009,6(3):19-23.
[19] 董治宝,高尚玉, Fryrear D W. 直立植物:砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[J]. 水土保持学报,2000,14(1):7-11.
[20] 武胜利. 新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D]. 上海:华东师范大学,2007.
[21] 李金伟,李志忠,武胜利,等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. 中国沙漠,2009,29(4):628-635.
[22] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等. 新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的试验研究(I)[J]. 中国沙漠,2007,27(1):9-14.
[23] 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(11):151-155.
[24] 王训明,郎丽丽,花婷,等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系试验研究[J]. 中国沙漠,2013,33(2):313-319.

(上接第 223 页)

[7] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机:原因与对策[J]. 地球科学进展,2007,22(9):896-906.
[8] 孔繁翔,马荣华,高俊峰,等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学,2009,21 (3):314-328.
[9] 刘小峰,盛昭瀚,金帅. 基于适应性管理的水污染控制体系构建:以太湖流域为例[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(2):73-78.
[10] 张晓晴,陈求稳. 太湖水质时空特性及其与蓝藻水华的关系[J]. 湖泊科学,2011,23(3):339-347.
[11] 尹荣尧,周燕,朱晓东. 江苏省太湖水污染防治对策措施[J]. 环境保护科学,2010,36(3):93-95.
[12] 王艳艳,孙勇,赵言文. 江苏省太湖流域农业面源污染现状分析及防治措施[J]. 江西农业学报,2008,20(8):118-121.
[13] 冯丽娟,封莉,孙德智,等. 防护林植被体系对面源污染物氮磷的去除作用[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2011,26(5):548-550.
[14] 吴殿鸣,薛建辉,吴永波. 生态防护林减轻农田氮素面源污染的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(6):134-138.
[15] 牛勇,余辉,张敏,等. 太湖流域典型土地利用方式下入湖河流水质污染特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(2):205-211.
[16] 中华人民共和国林业部科技司. 林业标准汇编(3)[M]. 北京:中国林业出版社,1991.
[17] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2011,47(4):611-620.
[18] 文璐,刘晶岚,习妍,等. 北京地区重要古树土壤物理性状分析[J]. 水土保持研究,2011,18(5):175-178.
[19] Jenkinson D S, Andrew S P S, Lynch J M, et al. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1990,329(1255):361-368.
[20] 罗利芳,张科利,符素华. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报,2002,22(3):58-61.
[21] 薛建辉,阮宏华,刘金根,等. 太湖流域水岸生态防护林体系建设技术与对策[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(5):13-18.
[22] 李泽波,张建锋,陈光才,等. 安吉赋石水库板栗林地地表径流污染物特征研究[J]. 水土保持学报,2013,27(3):90-94.
[23] 柏方敏,田大伦,方晰,等. 洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征[J]. 生态学报,2010,30(21):5832-5842.