

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 2013

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 丹, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)
中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205170737

李建兴,何丙辉,谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1547.

Li J X, He B H, Chen Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1535-1547.

不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响

李建兴, 何丙辉*, 谌芸

(西南大学资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:为明确三峡库区植被边坡植物物种根系特征与土壤渗透性之间的关系,以裸地为对照,应用WinRHIZO(Pro. 2004c)根系分析系统对香根草(*Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、狗牙根(*Cynodon dactylon*(L) Pers.)和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)等4种护坡草本的根系特征进行定量分析。结果表明:(1)紫花苜蓿和香根草的根长密度和根表面积密度显著大于狗牙根和百喜草;(2)不同草本类型和同一草本不同土层之间土壤渗透性存在较大差异,且各草本土壤渗透性随土层深度的增加而降低;相对于裸地而言,4种草本均能显著增强土壤渗透性,其土壤渗透性优劣表现为:香根草>紫花苜蓿>百喜草>狗牙根;(3)土壤的初始入渗率、稳渗率、平均渗透率和渗透总量等各参数均随根长密度和根表面积密度增大而增强,且与直径介于0.5—5 mm不同径级的根系特征之间存在明显的相关性,故根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于0.5—5 mm径级的根长密度和根表面积密度;(4)根长密度、根表面积密度对考斯加科夫入渗模型参数K和a有较大影响,随着根长密度和根表面积密度的增加,表征土壤初始入渗率的K值逐渐增大,而表征入渗能力衰减的参数a逐渐减小。

关键词:三峡库区;根长密度;根表面积密度;土壤渗透性;土壤入渗参数

Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration

LI Jianxing, HE Binghui*, CHEN Yun

College of Resources and Environment/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Plant root system plays important role in soil erosion protection and affects hillslope hydrological process through infiltration. To quantitatively investigate root features of typical herb plants for hillslope protection in the Three Gorges Reservoir Region and their influence on soil infiltration, soil initial infiltration, average infiltration, stable infiltration and accumulative infiltration were measured on 4 typical hillslope protection herb plants, *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash, *Paspalum notatum* Flugge, *Cynodon dactylon*(L) Pers. and *Medicago sativa* L., with bare land as a control. Soil samplers were used to take soil samples from the test area for laboratory experiments. Double-rings method was applied to make on-site measurement of soil infiltration. Root analysis system, WinRHIZOPro. 2004c was used to characterize the root systems. The results indicated that: (1) *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash and *Medicago sativa* L. had considerable higher root length density and root surface area density, as compared with *paspalum notatum* Flugge, *Cynodon dactylon*(L) Pers. (2) The soil infiltration rates were significantly amongst the different herb plants and at different soil layers under the same herb plants. The soil infiltration rates of soil under herb plants were significantly higher than that of bare soil and declined with the increase in soil depth. The soil infiltration rates from high to low were in the order of *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash,

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAD31B03);中央高校基本科研业务费专项资金(XDK2010C046);国家自然科学基金(40971166);国家林业局公益性行业科研专项课题(201104043);重庆市重大科技专项(CSTC2009AB1115);基于产学研的生态环境类研究生创新型培养模式构建(JG2010005);西南大学生态学重点学科“211工程”三期建设项目

收稿日期:2012-05-17; **修订日期:**2013-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

Medicago sativa L., *Paspalum notatum* Flugge, *Cynodon dactylon*(L) Pers. (3) The initial, average and steady infiltration rates were 2.42, 1.65 and 1.38 mm/min for *Cynodon dactylon*(L) Pers., 3.87, 2.42 and 2.11 mm/min for *Medicago sativa* L., 4.84, 3.37 and 3.00 mm/min for *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash and 2.93, 1.79 and 1.39 mm/min for *Paspalum notatum* Flugge and 1.31, 0.86 and 0.71 mm/min for bare land respectively. (4) The soil initial, steady and average infiltration rates as well as cumulative infiltration were increased with increases in root length density and root surface area density, which were evidently correlated with root diameter from 0.50 to 5.00 mm. (5) Root length density and root surface density had significant impacts on Kostiakov's model parameters, K and a . The K value, representing initial infiltration rate increased with increase in root length density and root surface area density and the a value, representing the decrease rate of infiltration decreased with them. The K value from high to low were in the order of *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash, *Medicago sativa* L., *Paspalum notatum* Flugge, *Cynodon dactylon*(L) Pers., Bare land. The K value and a value were 1.382 and 0.473 for Bare land, 4.275 and 0.307 for *Vetiveria zizanioides*(Lin.) Nash, 3.814 and 0.312 for *Medicago sativa* L., 3.325 and 0.452 for *Paspalum notatum* Flugge and 2.742 and 0.404 for *Cynodon dactylon*(L) Pers. respectively. The results will be useful for hillslope vegetation protection and soil erosion control.

Key Words: the three gorges reservoir region; root length density; root surface density; soil infiltration capability; soil infiltration parameter

三峡库区丰富的降雨量不仅会引发滑坡、泥石流等地质灾害,且对裸露边坡造成严重侵蚀,引发水土流失^[1-2]。近年来为减少水土流失,增加边坡稳定性,以草本植被为主的边坡构建模式越来越受到广大学者的重视和关注^[3-4]。已有研究表明,草本植物根系在防止表土侵蚀、浅层滑坡,降低地表径流产流、增加地表入渗等方面起着重要作用^[5-6]。地表入渗过程和渗透能力决定了降雨进程的水分再分配,从而影响坡地地表径流和流域产流及土壤水分状况^[7]。根系对土壤渗透性有明显的改善作用,一方面根系通过穿插、网络及固结将土壤单粒粘结起来改善土壤的团粒结构和孔隙性^[8],间接增强土壤渗透性。另一方面根与茎在其连接处形成微型拦土栅阻止土粒搬运,且沉积的土粒在连接处形成许多微型滤水土体^[9],直接增加径流就地入渗。因此研究草本植物根系分布对土壤渗透性的增强作用,对三峡库区边坡防护与植被构建具有重要的实践指导意义。

前人对土壤渗透性及根系方面做了大量的研究,在土壤渗透性方面,主要集中在土壤入渗过程、入渗特征、入渗机理、模型构建^[10-11]以及土壤理化性质^[12-14]对渗透性的影响方面。在根系方面,主要集中在根系对土壤养分^[15]、土壤机械组成、水稳定性团聚体^[16]、土壤抗冲、抗水蚀性能^[17-19]的影响方面,而关于根系分布对土壤渗透性的影响较少关注。王国梁^[12]等研究发现植物根长密度具有较好的改良土壤、提高土壤入渗能力的功能。由于根长密度参数能反映根系在土体中的稠密度和交织穿插能力,且易于测量,常被用于研究根系分布与土壤渗透的关系^[18],而根表面积密度、根重密度与根长密度显著相关^[18],二者也应被作为研究土壤渗透性的参数,但前人较少关注^[19]。前人通过对树木根系的研究,发现细根对土壤渗透性的改善最为明显,而何种径级的细根对土壤渗透性的改良作用效果最好至今尚无定论。因此本文对三峡库区4种护坡草本植物的根系特征及土壤渗透性进行研究,试图解决以下问题:(1)根系特征与土壤入渗能力及土壤入渗模型参数之间的关系;(2)根长密度、根表面积密度及根重密度等根系参数与土壤各入渗参数的关系;(3)不同径级的根系特征与土壤渗透性的关系。

1 材料与方法

1.1 试验样地自然概况

试验点位于重庆市北碚区歇马镇西南大学歇马试验基地,地理位置为106°48'54"E, 29°45'08"N。这里属亚热带季风气候,年平均降雨量1100 mm,年平均气温18.3℃,年日照1270 h,海拔563 m,丘陵地貌,土壤为紫色土。

1.2 试验设计和样品采集

试验以香根草(*Vetiveria zizanioides* (Lin.) Nash)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (L) Pers.)和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)4种南方水土保持常用草本植物为对象。于2010年2月初,在西南大学歇马试验基地内,选一样地划分为1,2,3,4区,作为各草本的育苗区,将预先准备好的4种草本种子,分别播于各小区内,进行播种育苗,在育苗区间对各小区统一浇水以保证顺利出苗,且定期除杂草。于2010年3月底,选另一样地划分为A、B、C、D、E区,在各区内进一步划分出3个 $6\times 4\text{ m}^2$ 的小区,共设15个小区。选择育苗区内的健壮幼苗,在A、B、C、D各区,以株行距为 $30\text{ cm}\times 35\text{ cm}$ 分别栽植紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草,其中E区为对照(裸露地)。在栽培期间,各区进行常规管理,定期除杂草。

于2011年8月底,对各小区进行采样。按照S型曲线,选择健壮的植株,确定采样点。去除植株的地上部分后,以植株为中心点,将环刀(底面积 20 cm^2 ,高5cm)圆心与中心点重合,沿着植株竖直向下分层(每层为10cm)取各土层的原状土样,每个小区取3个重复,分别按0—10,10—20,20—30cm的土壤层进行取样,共计135个土样。然后利用采样器,对每个采样点的不同土壤层进行土样采集,将同一小区不同采样点的土壤进行混合,每个混合土样取500g左右带回实验室,用于测定土壤的理化性质(如表1)。

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Soil basic characteristics of experimental field

类型 Type	土层 Soil layer /cm	容重 Bulk density /(g/cm ³)	总孔隙度 Soil total porosity /%	非毛管 孔隙 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙 Capillary porosity /%	有机质 SOM /(g/kg)	机械组成/% Soil mechanical composition		
							砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
狗牙根	0—10	1.46	36.56	5.29	31.27	12.12	30.08	52.01	17.91
<i>Cynodon dactylon</i> (L) Pers.	10—20	1.56	33.02	2.33	30.69	9.52	29.14	50.41	20.45
紫花苜蓿	20—30	1.60	31.12	1.60	29.52	8.71	27.55	48.56	23.89
<i>Medicago sativa</i> L.	0—10	1.39	42.71	8.66	34.05	13.35	33.39	47.41	19.20
	10—20	1.45	37.83	4.90	32.93	12.49	31.25	49.46	19.29
	20—30	1.50	36.09	4.33	31.76	12.02	30.44	49.58	19.98
香根草	0—10	1.41	43.65	11.56	32.09	14.62	34.66	45.95	19.39
<i>Vetiveria Zizanioides</i> (Lin.) Nash	10—20	1.50	37.71	6.70	31.01	13.79	33.65	47.20	19.15
百喜草	20—30	1.62	33.00	2.21	30.79	11.56	31.45	48.66	19.89
<i>Paspalum notatum</i> Flugge	0—10	1.50	36.48	2.83	33.65	12.07	30.16	50.60	19.24
	10—20	1.52	34.38	2.27	32.11	11.64	28.93	50.36	20.71
	20—30	1.55	34.69	1.80	32.89	11.72	27.86	50.21	21.93
裸地	0—10	1.55	29.87	3.30	26.57	9.65	31.74	49.34	18.92
<i>Bare land</i>	10—20	1.61	33.76	1.83	31.93	8.85	29.11	49.86	21.03
	20—30	1.62	34.38	1.67	32.71	8.28	27.62	49.43	22.95

1.3 样品的测定和分析方法

土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均采用环刀法测定;土壤入渗采用双环法测定^[20-23];土壤机械组成采用吸管法测定;有机质采用重铬酸钾-外加热法测定。

试验结束后,取出环刀内的土壤,置于0.05mm的网筛内进行冲洗,直至洗出所有的根系,将根系放入装有蒸馏水的蒸发皿中,用镊子将根系从杂质中分离出来,然后采用EPSON LA在400 dpi下进行灰度扫描,使用WinRHIZO(Pro. 2004c)根系分析系统对根系长度、根表面积及不同径级的根长、根表面积等各参数进行分析,最后将根系装入纸信封内在105℃条件下烘72 h,获得根系生物量。

1.4 数据整理与统计分析

初始入渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间(最初入渗时间取前3 min);平均渗透速率=达稳渗时的渗透总量/达稳渗时的时间;稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定(即内环水头趋于稳定)时的渗透速

率^[7,24], 渗透总量统一取前 90 min。

根长密度=环刀内根系的长度/环刀体积;根表面积密度=环刀内根系表面积/环刀体积;根重密度=环刀内烘干根系生物量/环刀体积。

描述土壤入渗过程的数学模型有许多,如 Philip 公式、Kostiakov 经验公式和 Horton 方程等^[10-11]。其中 Kostiakov 经验公式与实际情况吻合较好,且其中的各参数亦能反映土壤入渗特征,故常被用于描述土壤入渗过程^[7,13-14]。计算入渗速率 i 和累积入渗量 I 的公式如下:

$$i_t = i_1 t^{-a} \quad (1)$$

$$I_t = \frac{i_1}{1-a} t^{1-a} = K t^{1-a} \quad (2)$$

式中, i_t 为 t 时刻的入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); i_1 为第一时间单位末时的入渗速率 (mm/min); I_t 为 t 时刻的累积入渗量 (mm); K 为经验入渗系数, 相当于第一个时段内平均入渗速率 (mm/min); a 为经验入渗指数, 反映土壤入渗能力的衰减速度。

采用 Excel 2010 软件对测定数据进行处理分析及作图,用 SPSS18.0 软件对土壤渗透性与不同径级根系参数进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同护坡草本的根系特征

由表 2 可以看出,紫花苜蓿根系的根长密度、根表面积密度以及根重密度的均值均较大。就根长密度和根重密度而言,紫花苜蓿显著高于香根草、狗牙根和百喜草;就根表面积密度而言,紫花苜蓿与香根草之间差异性不显著 ($P>0.05$),但二者显著大于狗牙根和百喜草,大小表现为:香根草>紫花苜蓿>百喜草>狗牙根。香根草的根表面积密度大于紫花苜蓿,但根重密度显著小于紫花苜蓿,这种根表面积和生物量不对称的比例关系,与植物本身的生态学特性有关,紫花苜蓿的粗根所占比例较大,而香根草主要为细根。

表 2 4 种护坡草本的根系特征参数

Table 2 Parameters of the root characteristics 4 typical herb plants for hillslope protection

草本类型 Herb type	根长密度/(cm/cm ³) Root length density	根表面积密度/(cm ² /cm ³) Roots surface area density	根重密度/(mg/cm ³) Root weight density
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	9.204±0.447a	4.469±0.858a	200.911±99.412a
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i> (Lin.) Nash	9.199±1.037a	5.145±0.991a	85.851±7.766b
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L) Pers.	1.847±0.517b	0.985±0.495b	3.506±0.952c
百喜草 <i>Paspalum notatum</i> Flugge	3.249±1.172b	1.540±0.072b	9.266±2.936c

表中数据为平均值±标准差 ($n=9$);同列数据标有不同小写字母表示利用 Duncan 分析得出的显著性关系,不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同护坡草本的土壤水分入渗性能分析

水分入渗过程是一个复杂的水文过程,与土壤结构、根系分布、土壤孔隙、有机质含量及水稳定性团聚体等密切相关。在研究土壤渗透性时,常采用的 4 个指标是初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量^[7,24]。由图 1 可以看出,除初始入渗率外,各草本不同层次土壤渗透性能各指标大小均表现为:香根草>紫花苜蓿>百喜草>狗牙根>裸地,初始入渗率、平均入渗率、稳渗率和 90 min 的渗透总量最小都出现在裸地,其平均大小分别为:1.31、0.86、0.62 mm/min 和 72.86 mm,相对于裸地的各土壤层而言,4 种草本类型都不同程度地改善了土壤的渗透性能。此外前 3 个土壤入渗特征值在不同草本之间变化较大,表现出初始入渗率>平均入渗率>稳渗率的规律。各草本类型 0—10、10—20、20—30 cm 土壤层的初始入渗率、稳渗率、平均渗透速率和 90 min 的渗透总量存在较大差异,其大小均表现为随土壤深度的增加而降低,表明各草本的土壤渗透性能随土壤深度的增加而减弱,其原因应与根系密度分布随土壤层的增加而呈指数分布^[25]或线性分布^[26]降低,根系改良作用随土壤深度的增加而减弱密切相关。

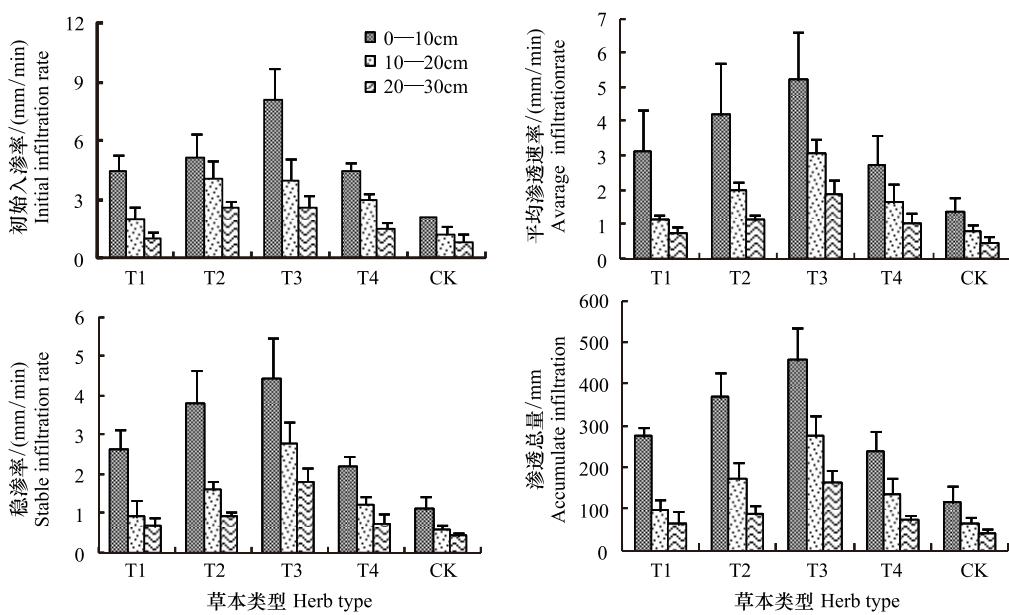


图1 不同护坡草本的土壤入渗率

Fig.1 Soil infiltration rates of different typical herb plants for hillslope protection

T1:狗牙根,T2:紫花苜蓿,T3:香根草,T4:百喜草,CK:裸地。T1:*Cynodon dactylon* (L) Pers., T2:*Medicago sativa* L., T3:*Vetiveria zizanioides* (Lin.) Nash, T4:*Paspalum notatum* Flugge, CK:Bare land

2.3 土壤渗透性与根系参数

在对土壤渗透性参数与根重密度、根长密度及根表面积密度进行分析时发现(表3):根表面积密度与土壤的初始入渗率极显著相关,其方程为 $y=1.613x-2.526(R^2=0.935,P<0.01)$,与稳定入渗率、渗透总量和平均渗透率显著相关,相关系数分别为0.914、0.896和0.903。从表2、图1可以看出,当根表面积密度从0.985 cm²/cm³增加到5.145 cm²/cm³,3个土层的初始入渗率、平均渗透率、渗透总量和稳定入渗率的平均值分别从2.42 mm/min、1.62 mm/min、144.31 mm、1.38 mm/min增加到4.84 mm/min、3.37 mm/min、297.32 mm、3.00 mm/min,各参数均随根表面积密度的增加而增大,且呈线性相关。根长密度与土壤的初始入渗率、渗透总量、平均渗透率和稳定入渗率均显著相关,相关系数分别达0.901、0.831、0.844和0.850,各参数均随根长密度的增加而增大,愈呈现显著的线性相关。而根重密度与各渗透性参数的相关性均达不到显著水平。

表3 土壤渗透性与根系参数之间的回归方程

Table 3 Regression equations between soil infiltration and parameters of roots

参数 Parameter	根长密度 Root length density	根表面积密度 Roots surface area density	根重密度 Root weight density
初始入渗率 Initial infiltration rate	$y=2.998x-4.512$ ($R^2=0.901, P<0.05$)	$y=1.613x-2.526$ ($R^2=0.935, P<0.01$)	$y=42.224x-69.811$ ($R^2=0.435, P>0.05$)
稳渗率 Stable infiltration rate	$y=4.505x-3.045$ ($R^2=0.850, P<0.05$)	$y=2.468x-1.814$ ($R^2=0.914, P<0.05$)	$y=60.633x-44.317$ ($R^2=0.375, P>0.05$)
渗透总量 Accumulate infiltration	$y=0.046x-3.380$ ($R^2=0.831, P<0.05$)	$y=0.025x-2.003$ ($R^2=0.896, P<0.05$)	$y=0.605x-45.515$ ($R^2=0.344, P>0.05$)
平均渗透率 Average infiltration rate	$y=4.183x-3.746$ ($R^2=0.844, P<0.05$)	$y=2.286x-2.187$ ($R^2=0.903, P<0.05$)	$y=54.906x-50.95$ ($R^2=0.354, P>0.05$)

2.4 土壤渗透性与不同径级的根系特征

由表4可以看出,土壤渗透性与直径介于0.5—5 mm不同径级的根系特征之间存在明显的相关性,随着径级的增大,除初始入渗率外,稳定入渗率、渗透总量、平均渗透率与RLD、RSAD的相关系数均呈现出先增大

后减小的趋势,其最大值均出现在2—5 mm径级。不难发现,0.5—1 mm根系的RSAD与土壤的初始入渗率、稳定入渗率达到了极显著水平,且满足线性关系,其方程分别为 $y=0.6421x-1.1529(r=0.9884,P<0.01)$, $y=0.8764x-0.6256(r=0.9901,P<0.01)$,其次1—2 mm、2—5 mm径级的RLD与RSAD对土壤的渗透性均有较高的贡献。而 $D\leq 0.5$ mm的根系虽然根系生长、死亡周转速率较大,但与土壤渗透性的相关系数较小,原因可能是由草本种植时间较短,对土壤渗透性的影响达不到显著水平。

表4 土壤渗透性与不同径级根系特征(根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD))之间的相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil infiltration and characteristics (root length density and root surface area density) of roots indifferent sizes

根系径级 Diameter class of roots	根系参数 Root parameter	初始入渗率 Initial infiltration rate	稳定入渗率 Stable infiltration rate	渗透总量 Accumulate infiltration	平均渗透率 Average infiltration rate
$D\leq 0.1$ mm	RLD	0.477	0.359	0.323	0.343
	RSAD	0.421	0.318	0.273	0.290
0.1 mm < $D\leq 0.2$ mm	RLD	0.534	0.413	0.379	0.400
	RSAD	0.513	0.399	0.364	0.383
0.2 mm < $D\leq 0.5$ mm	RLD	0.759	0.650	0.624	0.646
	RSAD	0.775	0.680	0.654	0.672
0.5 mm < $D\leq 1$ mm	RLD	0.995 **	0.976 *	0.971 *	0.977 *
	RSAD	0.988 **	0.990 **	0.984 *	0.987 *
1 mm < $D\leq 2$ mm	RLD	0.954 *	0.990 **	0.995 **	0.992 **
	RSAD	0.945 *	0.987 *	0.993 **	0.988 *
2 mm < $D\leq 5$ mm	RLD	0.985 *	0.997 **	0.994 **	0.995 **
	RSAD	0.983 *	0.999 **	0.984 *	0.985 *
$D>5$ mm	RLD	0.791	0.714	0.686	0.700
	RSAD	0.851	0.770	0.747	0.763

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01, n=36$

2.5 根系与入渗模型参数的关系

由表5明显看出,在0—30 cm土层中, K 值的总平均大小表现为:香根草(4.275)>紫花苜蓿(3.814)>百喜草(3.325)>狗牙根(2.742)>裸地(1.382),而 a 值的总平均大小表现为:裸地(0.473)>百喜草(0.452)>狗牙根(0.404)>紫花苜蓿(0.312)>香根草(0.307)。随着土层深度的增加, K 值逐渐减小,而 a 值总体呈现出先增大后减小的趋势,其最大值出现在10—20 cm土层。

由表6可以看出,不同径级的根长密度和根表面积密度与 K 值正相关,与 a 值负相关,其中0.5—1 mm的根长密度和根表面积密度对 K 值的影响最明显,达到了显著水平,而各径级的根系参数对 a 值的影响均达不到显著水平,但1—2 mm的根长密度和根表面积密度对 a 值的影响最明显,相关系数分别达-0.765、-0.776。

3 讨论

3.1 根系参数对土壤渗透性的影响

为研究根系各参数对土壤渗透性的影响,对南方水土保持常用草本植物:香根草、百喜草、狗牙根和紫花苜蓿进行了研究,研究发现土壤渗透性与根长密度、根表面积密度显著正相关,与根重密度相关性达不到显著水平。其原因主要是:

根表面积密度能反映根系与土体接触的紧密程度^[18],由表3可以看出根表面积密度与渗透各参数均呈现出显著的线性关系,且具有较大根表面积密度的香根草、紫花苜蓿,呈现出较强的土壤渗透性。一方面根系与土壤充分接触均不同程度的增加了土壤孔隙、降低了土壤容重,提高了土壤有机质含量(表1),另一方面根系表面与土壤的接触面构成了较好的导水通道,形成生物性大孔隙,土壤水分入渗过程中大孔隙及传导孔隙是水分流动的主要通道,水分的移动能力、运动状态受土壤较大尺度孔隙含量及分布状况的直接影响。李卓^[13]等认为毛管作用微弱的大孔隙越多,水分在土壤中的流动通道越畅通,水流的实际过水面积也越大。由

于各草本植物根系与土壤充分接触,增加了土壤大孔隙,有效增加土壤的过水断面面积,从而改善土壤的导水性能,故入渗能力均比对照显著增强。

表5 不同草本类型 Kostiakov 模型回归分析结果

Table 5 The regression analysis of Kostiakov models of soil infiltration of different herbal type

草本类型 Herb type	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.			香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i> (Lin.) Nash			狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L) Pers.		
	土层/cm Soil layer	0—10	10—20	20—30	0—10	10—20	20—30	0—10	10—20
K	6.389	3.296	1.758	8.325	3.168	1.332	5.132	2.396	0.697
a	0.259	0.438	0.238	0.419	0.297	0.205	0.426	0.504	0.283
R ²	0.779	0.696	0.553	0.714	0.768	0.786	0.753	0.662	0.778

草本类型 Herb type	百喜草 <i>Paspalum notatum</i> Flugge			裸地 Bare land			
	土层/cm Soil layer	0—10	10—20	20—30	0—10	10—20	20—30
K	5.571	3.346	1.059	2.064	1.617	0.465	
a	0.488	0.506	0.361	0.418	0.507	0.495	
R ²	0.697	0.652	0.708	0.714	0.668	0.749	

表6 土壤入渗模型参数与不同径级根系特征(根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD))之间的相关分析

Table 6 Correlation analysis between soil infiltration model parameters and characteristics (root length density and root surface area density) of roots indifferent sizes

参数 Parameter	RLD			RSAD		
	0.5 mm < D ≤ 1 mm	1 mm < D ≤ 2 mm	2 mm < D ≤ 5 mm	0.5 mm < D ≤ 1 mm	1 mm < D ≤ 2 mm	2 mm < D ≤ 5 mm
K	0.914 *	0.835	0.840	0.919 *	0.833	0.844
a	-0.522	-0.765	-0.666	-0.554	-0.776	-0.627

根长密度一方面能反映根系在土体中的延伸、穿插、交织程度,另一方面影响着养分向植物体的输送以及在土壤的运移^[15]。研究发现,随着根长密度的增加,土壤渗透性各参数明显增强,且呈现出显著的线性关系,主要是由于各草本根系穿插、延伸过程中会形成横向和纵向的植物根孔,Reynolds^[28]等发现水分下渗过程中优先沿植物根孔运输。故根长密度越大,根系的穿插、交织程度越强,水分沿根孔入渗越快。

根系衰老、死亡后,一方面由于根系的收缩,在土壤中留下大量根孔^[5],另一方面转化为有机质、促进土壤中团聚体的快速形成^[29]。二者均与根重密度的大小有关,理论上根重密度越大,形成的根孔越大,腐烂后有机质含量越高,渗透性越强,但本文研究发现根重密度与初始入渗率、稳定入渗率、渗透总量以及平均渗透率相关性均不显著,原因可能是各草本种植时间较短,处于生长旺盛期,衰老根系较少,其次本试验所分析为根系的总根重密度,没有分析根系各径级根重密度对渗透性的影响,而刘道平^[24]等研究发现≤1 mm 细根根重与土壤渗透性显著相关,因此不同径级根系的根重密度对土壤渗透性的影响有待进一步讨论。

3.2 各径级根系对土壤渗透性的影响

草本植物根系在土体中穿插、缠绕来分散、串联、固结土壤颗粒,改善土壤物理性质,提高土壤自身的水力学特性,从而增加土壤渗透性。李勇^[30]、刘国彬^[17]认为 D ≤ 1 mm 根系细根能显著影响土壤物理性质,徐少君^[18]、刘道平^[24]在前人的基础上进一步证明 D ≤ 2 mm 根系的根长密度、根表面积密度对土壤渗透、抗冲作用等水力学特性的增强作用。本文研究发现,根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于 0.5—5 mm 径级的根系,由于该径级的根系一方面充分接触土壤,有效缠绕、串结土体,另一方面根系分泌的高、低分子量分泌物可作为有机胶结剂,能够增加土壤颗粒的结合强度,降低变湿速率,从而促进土壤的团粒化作用^[8]。而根系径级过大或过小对前两方面的增强作用都将减弱,对土壤渗透性的增强作用随之减小。

3.3 根系对入渗模型参数的影响

经验入渗系数 K 是反映土壤入渗能力的一个重要指标,它表示土壤入渗开始后第一个单位时间(1 min)内单位面积上的平均入渗速率或第一个单位时段末单位面积上的累积入渗量^[13-14],其数值的大小主要取决于入渗时土壤结构和状况^[31]。李卓等^[13]、李雪转等^[14]认为当原始含水量、土壤质地基本相似时, K 值的大小主要取决于土壤孔隙分布状况。研究发现 K 值随着根长密度、根表面密度的增加而逐渐增大, K 值呈现出与根长密度、根表面积密度大小相同的规律,表现为:香根草>紫花苜蓿>百喜草>狗牙根>裸地。由于草本植物的根系分布不同,其孔隙分布状况不同,草本植物生长过程中根系的穿插、挤压以及根系死亡后形成的孔道,是土壤孔隙的主要来源,王大力等^[32]发现森林土壤中植物根系所形成的植物根孔占据土壤孔隙的35%以上,香根草和紫花苜蓿不同径级的根长密度、根表面积密度较大,所形成的各种尺度的生物性大孔隙较丰富,相反,百喜草、狗牙根不同径级的根长密度、根表面积密度较小,根系作用形成的大孔隙和细小孔隙相应减少。在入渗初期,由根系腐烂、穿插形成的根孔,由于其在土壤中形成广泛连续的大孔径孔隙使得土壤水分和溶质形成优先水流^[32],导致水分在运动过程中不与土体发生充分的相互作用,而是直接快速地进入土壤深层^[33]。所以,根长密度、根表面积密度较大的香根草和紫花苜蓿, K 值较大,而根长密度、根表面积密度较小的狗牙根和百喜草, K 值较小。

经验入渗指数 a 是反映土壤入渗能力衰减的重要指标,其值越大,入渗衰减得越快,其值越小,入渗衰减得越慢。其值大小主要取决于由于土体润湿而引起的土壤结构的改变^[31]。研究发现经验入渗指数 a 随着根长密度、根表面密度的增加而减弱,不同草本 a 值呈现出与根长密度、根表面积密度大小相反的规律,表现为:裸地>百喜草>狗牙根>紫花苜蓿>香根草。由于根长密度、根表面积密度较大的香根草和紫花苜蓿,一方面其根系提高土壤中水稳定性团聚体数量,改善土壤团粒结构,增强抵抗水流对土粒分散、悬浮和运移的能力^[16],减少在土壤入渗过程中,溃散的团粒体和粉粒对土壤孔隙的堵塞;另一方面在根系的作用下,土壤大孔隙含量较多,即使遇水作用后土粒的发生膨胀,但对大孔隙体积不会产生大的影响,故二者土壤入渗衰减得越慢。相反,无根系的裸地或者根系分布较少的百喜草和狗牙根,一方面抵抗水体分散和悬浮的能力较弱,溃散和溶解的土壤在土壤表面形成一层致密层,阻碍水分进一步入渗,另一方面土壤本身的膨胀作用进一步堵塞土壤孔隙,故其土壤入渗衰减得较快, a 值表现较大。

4 结论

(1) 对4种不同的护坡草本渗透性分析发现:相对于裸地而言,4种草本均能增强土壤渗透性,紫花苜蓿和香根草增强效果最为明显。各草本不同土层的渗透性存在较大差异,渗透性能随土壤深度的增加而减弱,土壤渗透性优劣总体表现为:香根草>紫花苜蓿>百喜草>狗牙根>裸地。

(2) 土壤的初始入渗率、稳渗率、平均渗透率和渗透总量等各参数均随根系的根长密度、根表面积密度增大而增强,且呈现显著的线性关系。

(3) 土壤渗透性与直径介于0.5—5 mm 不同径级的根系特征之间存在明显的相关性,根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于0.5—5 mm 径级的根系,而根系径级过大或过小对土壤渗透性的增强作用都将减弱。

(4) 根长密度、根表面积密度对考斯加科夫入渗模型参数 K 和 a 有较大影响,随着根长密度和根表面积密度的增加,表征土壤初始入渗率的 K 值逐渐增大,而表征入渗能力衰减的参数 a 逐渐减小。

References:

- [1] Yao S C. Study on influence of slope cutting to environment [D]. ChengDu: Southwest Jiao Tong University, 2005.
- [2] Duan X M. The status of slope vegetation research and its application. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 474-477.
- [3] Wei Q, Zhang Q L, Dai H Y, Guo X. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Daqing mountain. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 111-115.
- [4] Cheng X R, Huang M B, Shao M A, Fan J. Root distribution and soil water dynamics of *Medicago sativa* L. and *Stipa breviflora* Griseb. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(2): 170-175.

- [5] Chen Y, Zhu Y Y, He B H. Effect of root system of Bermuda Grass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) on slope reinforcement and soil erosion resistance in three Gorges Reservoir Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6) : 42-45.
- [6] Wang K. Effects of plant roots on soil anti-erosion. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3) : 250-252.
- [7] Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, Zhao Z J, Wu Y, Chen L. Effects of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15) : 4162-4172.
- [8] Czarnes S, Hallett P D, Bengough A G, Young, I M. Root and microbial-derived mucilage's affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51:435-443.
- [9] Wang Z F, Yang Y C, Zhao Z S, Deng J, Liao Z X, Liu J F. Study on soil mechanical mechanism in anti-water erosion ability of soil-root composite. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(2) : 39-45.
- [10] Philip J R. Theory of infiltration. *Advance in Hydroscience*, 1969, 5 : 216-296.
- [11] Hillel D. soil and water-physical principles and process. New York: Academic Press, 1977.
- [12] Wang G L, Liu G B. Effect of *stipa bungeana* communities on soil infiltration in soil profile in Loess Hilly Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3) : 227-231.
- [13] Li Z, Wu P T, Feng H, Zhao X N, Huang J, Zhuang W H. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6) : 40-45.
- [14] Li X Z, Fan G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3) : 188-190.
- [15] Han F P, Zheng J Y, Zhang X C. Plant root system distribution and its effect on soil nutrient on slope land converted from farmland in the Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2) : 50-55.
- [16] Wu Y, Liu S Q, Fu X Q, Wang J X. Study on improving soil s waterstable aggregates amounts by botanic roots. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservision*, 1997, 3(1) : 45-49.
- [17] Liu G B. Study on soil anti-scour-ability and its mechanism of grassland on Loess Plateau. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1998, 4 (1) : 93-96.
- [18] Xu S J, Zeng B, Lei S T, Su X L. Root features of Several Flooding-tolerant Plants and their roles in enhancing anti-erodibility of the soil in three gorges reservoir region. *Acta Pedolocia Sinica*, 2011, 18(1) : 160-165.
- [19] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, Cai X A. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance; A research review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4) : 895-904.
- [20] Osman N. Parameters to predict slop stability-soil water and root profiles. *Ecol Eng*, 2006, 28 : 90-95.
- [21] Ma L M, Tang Y P, Zhang M, Teng Y H, Liu D Y, Zhao J F. Evaluation of adaptability of plants in Water-Fluctuation-Zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4) , 1885-1892.
- [22] Sun H R, Wu R X, Li P H, Shao S, Qi L L, Han J G. Rooting depth of Alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(3) : 307-312.
- [23] Zhang W R, Xu B T. Forest soil positioning research methods. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986, 30-45.
- [24] Liu D P, Chen S X, Zhang J C, Xie L, Jiang J. Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji County of Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3) : 493-498.
- [25] Raats P A C. Steady fows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots. *Soil Sci Soc Am J*,1974, 38 : 717-722.
- [26] Prasad R. A linear root water up take model. *J Hyrdol*, 1988, 99: 297-306.
- [27] Shi H, Liu S R. The macroporosity properties of forest soil and its eco-hydrological significance. *Journal of Mountain Research*, 2005, 23(5) : 533-539.
- [28] Reynolds E R C. The percolation of rain water through soil demonstrated by fluorescent dyes. *Journal of Soil Science* 1966,17(1) ;127-132.
- [29] Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, He S Q, Wen Y, Gan C B. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1) : 33-36.
- [30] Li Y, Wu S X. Stabilization of soil structure by roots of *Artificial Locust* trees in purple soil region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998 (2) :1-7.
- [31] Taylor S A. Physical Soil//Hua M trans. Beijinig: Agriculture Press, 1983 : 50-78.
- [32] Wang D L, Yin C Q. Functions of root channels in the soil system. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5) : 870-873.
- [33] German P, Edwards W M, Owens L M. Profiles of bromide and increased soil moisture infiltration into soils with macropore. *Soil Sci. Soc. Am. J*,1984 , 48 : 237-244.

参考文献:

- [1] 姚裕春. 边坡开挖工程活动对环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.

- [2] 段晓明. 植被护坡研究与应用现状. 中国农业通报, 2007, 23(3): 474-477.
- [3] 巍强, 张秋良, 代海燕, 郭鑫. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [4] 成向荣, 黄明斌, 邵明安, 樊军. 紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分研究. 草地学报, 2008, 16(2): 170-175.
- [5] 谌芸, 祝亚军, 何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究. 水土保持学报, 2010, 24(6): 42-45.
- [6] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250-252.
- [7] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 赵占军, 吴云, 陈林. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [9] 王芝芳, 杨亚川, 赵作善, 邓健, 廖植辉, 刘军凤. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 39-45.
- [12] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响. 水土保持学报, 2009, 23(3): 227-231.
- [13] 李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [14] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- [15] 韩凤鹏, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
- [16] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 王金锡. 植物根系提高土壤水稳定性团粒含量的研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.
- [17] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. 水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [18] 徐少君, 曾波, 类淑桐, 苏晓磊. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应. 土壤学报, 2011, 18(1): 160-165.
- [19] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.
- [21] 马利民, 唐燕萍, 张明, 滕衍行, 刘东燕, 赵建夫. 三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价. 生态学报, 2009, 29(4): 1885-1892.
- [22] 孙洪仁, 武瑞鑫, 李品红, 邵帅, 戚琳璐, 韩建国. 紫花苜蓿根系入土深度. 草地学报, 2008, 16(3): 307-312.
- [23] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社. 1986: 30-45.
- [24] 刘道平, 陈三雄, 张金池, 谢莉, 姜姜. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.
- [27] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义. 山地学报, 2005, 23(5): 533-539.
- [29] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33-36.
- [30] 李勇, 武淑霞. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 水土保持学报, 1998(2): 1-7.
- [31] 泰勒 S A. 物理的土壤学//华孟译. 北京: 农业出版社, 1983: 50-78.
- [32] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能. 生态学报, 2000, 20(5): 870-873.

DOI: 10.5846/stxb201209121284

孟丹,王明玉,李小娟,宫辉力.京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究.生态学报,2013,33(5):1545-1558.

Meng D, Wang M Y, Li X J, Gong H L. The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1545-1558.

京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究

孟丹,王明玉,李小娟*,宫辉力

(城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,三维信息获取与应用教育部重点实验室,
首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘要:城市热环境是城市生态环境的重要方面,它与城市气候、城市生态、城市灾害有着重要的联系。以北京、上海、广州三地为研究区,选取近10年MODIS的夜晚地表温度(LST)产品MOD11A2,分别采用质心迁移、景观格局指数、空间自相关方法研究京沪穗三地近10年的不同等级热力景观质心迁移演变、格局变迁和空间集聚特征。主要结论为:三地热力景观随郊区向市中心趋近,体现了由低温区、次中温区向中温区、次高温区、高温区过渡的趋势;三地的中温区所占比例最大,城市热力景观破碎度三地中上海市最高,5种热力景观比较,次中温区和高温区的破碎度最高;城市热力景观离散度三地中北京市最高,低温区和高温区的离散度较高。热环境空间自相关分析表明三地均以高温-高温区,低温-低温区集聚为主,北京、广州高温-高温区分布于南部,且集中成片分布,而上海市高温-高温区分布比较离散,相对较为复杂。从分布面积来说,10a中北京、上海表现为先减少后增加,而广州则持续减少。总体而言北京热环境恶化,而广州、上海热环境有所好转。

关键词:城市热环境;热力景观格局;空间质心;景观格局指数;空间自相关

The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade

MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan*, GONG Huili

State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation,
Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System,
Key Laboratory of 3-Dimensional Information Acquisition and Application, Ministry of Education,
College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: The urban thermal environment is an important element for the urban ecological environment, urban climate and urban disasters. This paper selected MOD11A2, the MODIS LST night data to study the thermal environment evolution in Beijing, Shanghai and Guangzhou, which are the three major cities of China in the past decade. Three methods have been applied in the paper, Landscape centroid evolution, Landscape pattern index and spatial autocorrelation. Three main conclusions have been drawn as follows. Firstly the thermal landscape distributions in the three cities have moved from the suburb to the downtown. And the evolution trend of the thermal landscape is changed from the low temperature region, sub-middle temperature region to middle temperature region, sub-high temperature region and high temperature region. Secondly, among these five types of thermal landscape, the middle temperature region is the most prevalent. The urban thermal landscape fragmentation was highest in Shanghai among the three cities, and sub-middle and high temperature region has the highest fragmentation. The urban thermal landscape dispersion was highest in Beijing, and the dispersion of

基金项目:中国博士后科学基金(20110490447);北京市博士后科研基金(49);北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201310028011);973计划前期研究专项课题(2012CB723403)

收稿日期:2012-09-12; 修订日期:2013-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaojuanli@vip.sina.com

low and high temperature region was higher than the other types of thermal landscapes. Thirdly, thermal environment spatial autocorrelation analysis showed that the high-high temperature zones were adjacent, low-low temperature areas were adjacent, which are the main types in the temperature spatial agglomeration. And for Beijing and Guangzhou city, the high-high temperature zone located in the south of the city, the low-low temperature region located in the north. While, the spatial autocorrelation distribution of LST in Shanghai is more complicated. The distribution areas of high-high temperature varied among the three cities in the past decade. In Beijing, the distribution area increased shortly after decreasing, and in Guangzhou, the distribution area continued to decline, which preliminary reflects the heat island effect problem aggravated in Beijing, while weakened in Shanghai and Guangzhou.

Through comparisons and analysis, the paper has provided a reference for urban planning and urban living environment improvements, but there are still some inadequacies to be further studied. Firstly, this study only selected the January night LST data in the three cities. Because the time factors, such as season, daytime and nocturne, will affect the urban heat environment pattern, the comprehensiveness of the thermal environment pattern changes need to be improved. In addition, the paper only selected the data in the period of three years, the evolution regulation of the urban thermal environment pattern is not precise. Secondly, the landscape of urban heat environment were impacted by many factors, including the pattern of landuse, urban surface construction, weather conditions, terrain, anthropogenic heat emissions factors and so on. The analysis between the urban heat environment and impact factors will help reveal the mechanism of urban heat environment and which will be studied further.

Key Words: urban thermal environment; thermal landscape pattern; spatial centroid; landscape pattern index; spatial autocorrelation

随着我国经济的快速发展,我国的城市化进程不断加剧,其所带来的社会、经济和生态影响,不仅是我国而且是全球在未来相当长一段时间中的最重大事件之一。城市内包括空气、下垫面和各种外部因素组成的与热有关的热现象被称之为城市热环境。在北京,上海,广州这些大城市,热环境问题引起相关学者关注^[1-4],已经呈现比较明显的热岛效应。2010年7月5日,北京市最高气温达到40.6℃,地面温度也超过了60℃,成为北京有史以来同期最高温度;上海市2009年7月20日,徐家汇气温高达40℃,是上海气象记载史上的次高值;广州市2005年7月11—18日,出现持续性大范围高温炎热天气,导致市区内多辆汽车自燃。城市热环境体现了自然界输入城市的能量转化与人为活动造成的废热、废气排放的相互影响及关系。作为城市生态环境的重要方面,城市热环境与城市气候、城市生态、城市灾害等都存在着时空上的相互作用、相互依存关系,它对城市微气候、空气质量、能耗结构以及公共健康等方面都产生着深远的影响^[5]。因此,城市热环境的研究对于人居环境质量的提高,城市环境治理,城市规划问题,乃至世界气候变化都有着重大意义。

近年来随着空间信息技术的发展,国内外学者利用遥感和地理信息系统技术在热环境研究方面取得了良好进展。Rao^[6]是首个利用热红外遥感来研究城市热岛的学者,他利用ITOS-1热红外数据研究美国大西洋中部沿海城市地表温度分布模式,此后,Carlson^[7]利用AVHRR数据研究了Los Angeles地区地表温度分布模式,Carnahan^[8]利用TM热红外数据发现印第安纳波利斯城区与周围乡村地区的温度差异。国内学者采用TM、ASTER、HJ-1B等热红外波段数据对北京、上海、广州、南京等地城市热岛进行了大量研究^[9-15]。由于MODIS卫星的重访周期短,其数据对全球用户免费,应用非常广泛,王建凯^[16]等人利用MODIS数据研究北京城市热岛效应得出白天城市热岛具有明显的季节变化,夜晚季节变化较为稳定;葛伟强^[17]等人利用MODIS数据反演地表温度得出长三角地区热岛呈“Z”字型分布,夏季热岛强度最强;江志红^[18]等人对MODIS地表温度产品进行了评估,通过与台站地表温度的对比,认为MOD11A2数据精度高于MODISL1B反演资料。然而跨区域热环境状况对比研究的案例较少。景观生态学是将地理学的景观理论和生物学的生态理论相结合,研究景观单元的类型组成、空间配置以及与生态学过程相互作用的综合性学科^[19]。本文参考陈云浩^[20]将景观格局理

论用于城市热环境研究的方法,并沿用“热力景观”的概念,以近10年的MODIS地表温度产品为数据源,选取了地理差异性显著的北京、上海、广州三地为研究区,对比分析三地近十年热力景观演变特征,弥补了过去对单一地区,采用单一方法研究热力景观的不足^[21-22]。将景观生态学融入城市热环境研究中,并结合遥感和地理信息系统技术,对城市热环境的研究开辟了一个新的领域,为城市规划、生态城市建设提供决策依据。

1 研究区概况及数据选取

北京、上海、广州是我国三大城市,城市规模、发展速度位于前列,是我国的政治、经济、文化中心。城市发展及人为热的排放必然产生热环境问题,然而由于各自规划的发展阶段、城市建设步伐及自然地理条件、气候条件差异,热力景观演变也有各自的特点。研究区行政区划见图1。

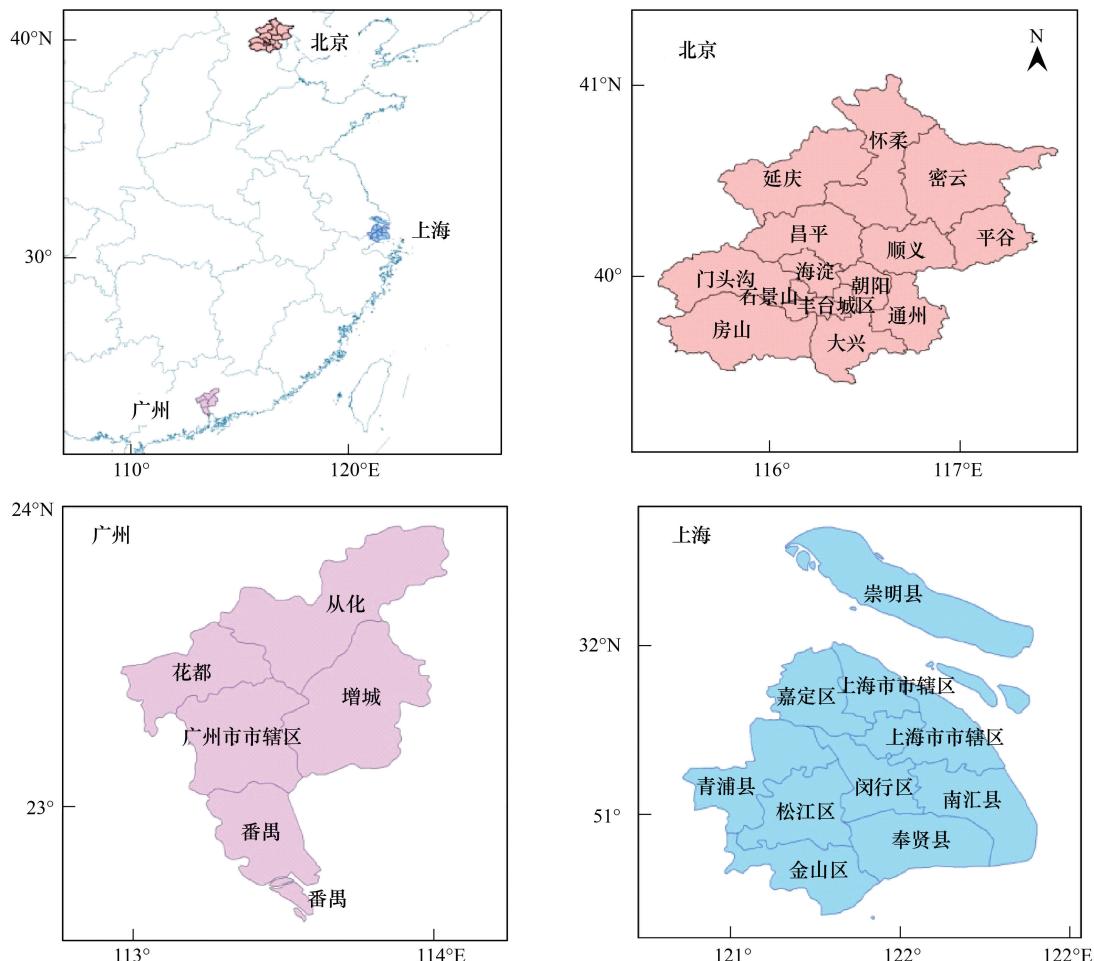


图1 研究区行政区划图

Fig. 1 The location of study areas

本文选取MODIS温度产品MOD11A2进行京沪穗三地热环境研究。MODIS可以提供多达44种增值产品,其中MOD11产品为陆地2、3级标准数据,它利用大气窗口2个热红外通道31(10.78—11.28μm)和32(11.77—12.27μm)的地表比辐射率和地表亮温作为输入条件,利用分裂窗算法进行地面温度反演,得出某一时刻的地表温度。MOD11A2是MODIS的三级产品,是通过8d的MOD11A1数据计算平均值而得到的,其投影为正弦曲线投影。该产品提供白天夜间地表温度数据、质量评估、观测时间、观测角、晴好白天和夜晚的天数以及不同地表覆盖类型在波段31、32的地表发射估计。本文选取MOD11A2夜间温度数据,空间分辨率1km,数据格式为HDF-EOS。

MODIS产品始于1999年,可为研究近10年的京沪穗三地热力景观演变提供数据,为探索热力景观随时

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 5 March ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated
nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle)
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K.
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元