

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

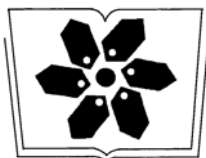
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

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/stxb201210281493

陆斌, 张胜利, 李侃, 马国栋. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1512-1519.

Lu B, Zhang S L, Li K, Ma G D. Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1512-1519.

秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及 对导水性能的影响

陆 斌^{1,2}, 张胜利^{1,2,*}, 李 侃³, 马国栋¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 大孔隙广泛分布于森林土壤中, 是定量研究与土壤水分运动有关的重要因素, 其研究可深化森林涵养水源机理的认识。基于田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙作为大孔隙的标准, 利用土壤水分穿透曲线和 Poiseuille 方程研究了秦岭火地塘林区森林土壤大孔隙分布特征及其对土壤饱和导水率的影响。结果表明, 林区土壤大孔隙当量孔径主要分布在 0.3—3.8 mm 之间; 当量孔径 > 1.5 mm 的大孔隙密度较小, 其数量仅占大孔隙总数的 5.37%; 各当量孔径的大孔隙密度随土层分布基本呈现为上层大、下层小的特点, 且垂直分布差异显著, 其与有机质含量分布有极显著的相关性。0—60 cm 土层大孔隙平均面积比顺序为: 针阔混交林 > 油松林 > 落叶阔叶林 > 华山松林。不同当量孔径的大孔隙密度与饱和导水率呈显著正相关关系, 当量孔径大于 1.5 mm 的大孔隙密度决定了饱和导水率 84% 的变异; 大孔隙率平均在 1.6%—13.3% 之间, 当其小于 5% 时, 饱和导水率随着大孔隙率增大而增大。

关键词: 秦岭; 大孔隙; 当量孔径; 饱和导水率

Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains

LU Bin^{1,2}, ZHANG Shengli^{1,2,*}, LI Kan³, MA Guodong¹

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 National Forest Ecosystem Research Station in the Qinling Mountains of Shaanxi, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Macroporosity is an important factor related to soil water movement. Relatively little is known about soil macroporosity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains. Although they contribute relatively little to total soil porosity, macropores have a very important influence on saturated hydraulic conductivity and on subsurface flow. The study of macropores is important for understanding the characteristics of soil water movement and the mechanism of water conservation under forest vegetation. At the microscopic scale, the flow of water in all soil macropores is related to the size of the void. Furthermore, water flow rates are controlled by the smallest void in any single continuous flow path (i.e., pore neck). The objectives of this experiment were to study the distribution of soil macropores in the Huoditang Forest region and to determine the influence of these macropores on saturated hydraulic conductivity. The volume of soil macropores is equivalent to the volume of water in a soil at saturation minus the volume of water in the same soil at field capacity. This definition, along with water breakthrough curves and the Poiseuille formula were used in this study. The results showed that

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项 (201004036)

收稿日期: 2012-10-28; 修订日期: 2013-06-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: victory6515@sina.com

the equivalent radii of soil macropores in the Huoditang Forest ranged from 0.3 to 3.8 mm. Macropores with equivalent radii >1.5 mm made up only 5.37% of the total macropore content. The order of average area proportion of 0—60 cm layer was mixed forest > *Pinus tabulaeformis* forest > deciduous broadleaf forest > *Pinus armandii* forest. Heavy clay may restrict the development of macropores in the *P. armandii* forest soil. Macropore density was significantly greater in the upper soil layers than in the lower soil layers. There was significant correlation between macropore density and the soil organic matter content. Macropore distribution in the root zone differed significantly among the different forest types. The content of rock fragments in deeper soil layers also affected macropore distribution. The average densities of macropores with different equivalent radii were positively related with saturated hydraulic conductivity. The density of macropores with radii >1.5 mm accounted for 84% of the variability in saturated hydraulic conductivity. Soil porosity ranged from 1.6 to 13.3%. The saturated hydraulic conductivity increased with porosity when porosity was less than 5%. This is because the possibility of such discontinuous behavior increased both as the size and connectivity of the macropores increased and as the effect of capillary tension within the macropores became smaller. Pore structure is of crucial importance. In general, macropores, especially those with radii >1.5 mm, play a critical role in conserving water in forest soils.

Key Words: Qinling; macropores; equivalent radii; saturated hydraulic conductivity

壤中流的产生是森林涵养水源和调节径流的主要方式,大孔隙在其中起着重要的作用。大孔隙可促进侧向表层流和快速旁路流,被认为是为坡面浅土层暴雨洪峰提供重要优先流的路径^[1-2]; Wilson^[3]、Shipitalo^[4]、Weiler^[5]等研究发现,虽然土壤中大孔隙数量很少,但对传导水流有着重要作用,可明显地增加入渗,减少地表径流。Carneira 等^[6]研究发现,大孔隙的存在使土壤的饱和导水率增加了几倍,且对总入渗量贡献率可达到 85%; Wilson、Noguchi^[6]等认为直径大于 1 mm 的孔隙对传导水流有着重要的因素;而 Luxmoore^[7]发现大中孔隙的不同组合有着不同的导水速率。土壤中大孔隙的孔径及数量特征直接反映了林地优先路径的组成情况,研究林地土壤大孔隙分布规律有助于理解林区土壤的导水性能和壤中流的发展过程。

目前有关大孔隙的研究并未给出严格的定义和孔径范围,一般将孔径大于 0.03 mm, 0.06 mm, 0.085 mm, 0.1 mm 或 1 mm 的孔隙定义为大孔隙;孔径范围大致为 0.03—3 mm^[1,6,8-9]。受动物、植被根系或土壤自身等因素的影响,不同地区不同植被类型的大孔隙分布具有不同特点,这也导致了土壤水分运动空间上的差异^[10-11]。所以,要进一步完善林地土壤水分运动及流域生态水文过程理论,必须深入开展不同地区多重小尺度上有关大孔隙的研究。

本研究选择在秦岭南坡火地塘林场进行。秦岭南坡林区的水源供给集中了陕西省 73% 的水资源,

其涵养水源状况对周边及其下游地区社会和经济影响重大。在林区,径流多以壤中流的形式汇集,较大空隙的优先流运动起到了至关重要的作用^[12-14]。因此,系统的分析研究该区林地土壤大孔隙组成与数量分布规律及其对土壤水分运移过程的影响,有助于进一步理解流域水分运动规律以及林区壤中流的产汇流特征。同时,该区也是我国南水北调中线工程的主要水源地,故该研究还可为调水区水资源管理提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

火地塘林区位于秦岭南坡中山地带中心地段,选择在火地塘林区开展森林大孔隙的相关研究极具典型性和代表性^[13]。该区地处北纬 33° 18'—33° 28', 东经 108° 20'—108° 39', 属长江水系汉江流域。林区海拔范围 900—2450 m, 年平均气温 8—10 °C, 年平均降水 900—1200 mm, 年水面蒸发量 800—950 mm, 年总日照时数为 1100—1300 h。林区腐殖质层厚约 7—10 cm, 森林覆盖率达 91.8%。主要成林树种有锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、红桦 (*Betula albo-sinensis*)、光皮桦 (*Butula luminifera*); 伴生树种有: 漆树 (*Toxicodendron*)、鹅耳枥 (*Carpinus turczanowii*)、木姜子 (*Litsea phngens*)、青榨槭 (*Acer davidii*); 主要灌木有: 榛子 (*Corylus heterophylla*)、

山柳 (*Salix*)、刺悬钩子 (*Rubus phngens*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor Thunb*)、山马蝗 (*Desmodium sp.*)、卫矛 (*Euonymus alata*) 等。

试验区土壤以山地棕壤为主,平均厚度为 50 cm。成土母质以片麻岩、花岗岩、结晶片岩及似斑状花岗闪长岩风化的坡积和残积物为主。土壤中石砾分布较多且形状差异较大,油松林地石砾多介于 2—30 mm,平均体积含量为 21.08%;针阔混交林和阔叶林地,≤30 mm 的石砾含量在 4%—8%之间,且多镶嵌有较大直径的半分化岩石。林地土壤中根系较丰富,多分布于 0—30 cm 土层,直径≤1 mm 的根系生

物量最大。其中针阔混交林和阔叶林地表层的腐根较多。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

实验选在林区最大的自然集水区火地沟流域进行。该区森林植被、地形地貌、土壤等具有秦岭南坡中山地带的典型特征。区内植被为松栎林和松桦林为主的落叶阔叶和针阔叶混交林,主要树种有锐齿栎、山杨、白桦、油松和华山松等^[13]。根据林区的主要成林树种分布,本研究设置了 4 种主要林分类型(表 1)。

表 1 研究地土壤(0—60 cm)的基本特征

Table 1 Selected soil physical and chemical properties of the experimental site (mean±SD)

林分类型 Vegetation	坡向 Slop aspect	坡度 Slop degree /(°)	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	粘粒 Clay /%	有机质含量 Organic matter /(g/kg)	容重 Bulk density /(g/cm ³)
油松林	西南偏南方	27	56.85±6.41	42.39±6.29	0.77±0.21	30.18±4.38	1.13
华山松林	西南方	38	30.03±3.41	68.76±3.43	1.21±0.28	30.02±2.48	1.00
针阔混交林	东北方	37	33.31±5.05	65.90±4.64	0.79±0.41	34.19±6.54	1.03
落叶阔叶林	西南偏南方	37	50.83±5.61	48.67±5.72	0.51±0.11	29.52±4.22	0.91

油松: *Pinus tabulaeformis*; 华山松: *Pinus armandii*; 针阔混交林 Mixed forest; 落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest

1.2.2 大孔隙的计算方法

测量土壤大孔隙的方法有很多种(如示踪技术,土壤切片法,穿透曲线法,张力入渗仪测量法,X射线 CT 扫描摄像以及雷达探测技术等)^[15-19]。从森林土壤大孔隙水文效应的角度出发,采用土壤水分穿透曲线和 Poiseuille 方程相结合的方法较合适^[7]。该法测定的是“瓶颈”大小孔隙,而在微小尺度上,一个连续水流路径的出流速率受最小尺寸空隙(亦称为 pore necks)控制^[1]。与其它测定方法相比,该法所得参数更适合于描述大孔隙与土壤水分运动的关系,并适于林地多根系多石砾土壤的研究^[8]。

根据时忠杰^[8]、石辉^[15]、Radulovich^[17]等的研究,大孔隙定义为田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙。田间持水量到饱和含水量之间的排水过程首先是大孔隙排水,然后排水孔隙的孔径逐渐减小。对某一固定土样,最大孔隙半径就是第一次出水时的半径;而土样的最小半径就是当水流开始达到稳定时的半径^[9,15]。试验中土壤水分运动速率较慢,处于层流范围,假设土壤孔隙为圆形的情况下,可根据土壤水分穿透曲线理论,将流量方程(1)与 Poiseuille 方程(2)联合求解大孔隙的当量孔径(3):

$$Q = A v = \pi r^2 \tau L / t \quad (1)$$

$$Q = \pi r^4 \Delta P / (8 \eta \tau L) \quad (2)$$

$$r = \tau L (8 \eta / [t \Delta P])^{1/2} \quad (3)$$

式中, Q 为单位流量(cm^3/s); A 为孔隙面积(cm^2); v 为流速(cm/s); r 为孔隙孔径(cm); τ 为水流实际路径的弯曲系数,本研究取 1.2; L 为土柱长度(cm); η 为水的粘滞系数($\text{g}/\text{cm}/\text{s}$); ΔP 为压力水头(cm); t 为从首次加水开始记时的时间(s)。对任意时间水分出流流量进行观测,并利用式(3)计算出相应的孔隙孔径。将两孔隙孔径之间按照一定间隔划分出一个孔隙范围,以其平均值作为计算值,当间隔排水量为 Q_e 时,计算相应大孔隙数量(n):

$$Q_e = n A v = n \pi r^2 \tau L / t \quad (4)$$

1.2.3 土样采集与出流速率的测定。

2012 年 5—8 月,用环刀(直径 7 cm、高 5.2 cm)分层(A 层约 0—20 cm、B 层约 20—40 cm、BC 层约 40—60 cm)采集土壤样品,平放并尽量减少颠簸以保持土样的原状,带回实验室测定水分穿透曲线。每种植被类型设 3—5 个样点。将采集的原状土壤样品置于水中 12 h 以充分饱和,然后放置于粗砂上放置 12 h,使其达到田间持水量,并在环刀上边缘与

土壤样品接触的部分涂上凡士林,以保证水分不能通过土壤与环刀壁之间的孔隙直接流出。在土柱上部放置一张滤纸,以防止水分冲刷破坏表层土壤结构。土柱下部过滤板的出流孔密度为 5 个/cm²。用马氏瓶控制水头 2 cm,从加水开始计时,当土柱下部有水流出时,每隔 5s 或 10s 收集出流量,测定其体积,直到水流通量达到稳定为止。然后根据测定的出流量作水分穿透曲线,确定其水流通量达到稳定的时间,再参照 1.2.2 计算大孔隙的相关指标。根据水流稳定后的流量计算饱和导水率(K_s),统一换算为 10℃ 的饱和导水率(K_{10})。

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾法。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型大孔隙分布特征

研究区土壤大孔隙的当量孔径范围为 0.3—3.8 mm(表 2),该计算结果与王伟^[18]和 Germann 等^[1]所测土壤大孔隙孔径范围基本一致。最小孔径 0.3 mm,与土壤学中土壤通气孔中的粗孔隙孔径下限(孔径大于 0.3 或 0.2 mm)一致^[19],说明研究地森林土壤大孔隙主要为孔径大于 0.3 mm 的通气孔隙。

表 2 不同当量孔径的大孔隙密度

Table 2 Number of soil macropores in each radius interval

植被类型 Vegetation	土壤层次 Profile	不同当量孔径(mm)大孔隙密度 Number of soil macropores in each radius interval / (个/m ²)						饱和导水率 Saturated Water Conductivity /(mm/min)
		(2.0—3.8) ×10 ²	(1.5—2.0) ×10 ³	(1.1—1.5) ×10 ³	(0.7—1.1) ×10 ³	(0.5—0.7) ×10 ⁴	(0.3—0.5) ×10 ⁴	
油松林	A	5.31±2.37	1.38±0.67	2.39±1.27	5.23±2.93	1.01±0.55	1.23±0.71	16.10±7.27
	B	2.64±0.90	0.68±0.26	1.32±0.41	2.72±0.89	0.53±0.15	0.87±0.23	11.00±0.10
	BC	0.47±0.67	0.15±0.22	0.29±0.22	0.66±0.24	0.13±0.05	0.23±0.09	1.80±0.58
华山松林	A	4.91±2.74	1.22±0.60	2.17±1.17	4.72±2.56	0.93±0.52	1.70±0.94	14.10±7.46
	B	2.33±1.05	0.72±0.31	1.23±0.52	2.61±1.06	0.53±0.25	0.97±0.10	10.90±3.08
	BC	0.45±0.64	0.17±0.24	0.31±0.34	0.61±0.72	0.13±0.15	0.20±0.22	2.10±1.98
针阔混交林	A	5.71±1.58	1.67±0.51	2.94±1.04	6.55±2.14	1.24±0.37	2.42±0.52	11.40±5.16
	B	3.93±2.04	1.20±0.68	2.30±1.47	5.12±3.64	1.02±0.75	1.93±1.76	7.20±2.40
	BC	1.21±1.71	0.32±0.36	0.52±0.62	1.07±1.16	0.17±0.18	0.38±0.46	3.30±3.74
落叶阔叶林	A	5.75±3.11	1.35±0.67	2.36±1.2	5.39±2.97	1.06±0.58	1.69±0.91	13.30±12.05
	B	1.42±0.63	3.76±1.41	0.59±0.21	1.25±0.41	0.22±0.06	0.26±0.09	2.30±0.96

* A、B、BC 分别表示林地土壤剖面的淋溶层、淀积层、过渡层(落叶阔叶林地土层深约 40 cm,过渡层不明显)

大孔隙密度为土壤单位断面积上的平均大孔隙数量。火地塘林区,0—60 cm 土壤大孔隙密度在 0.14×10^4 — 7.18×10^4 个/m² 之间,平均为 1.98×10^4 个/m²,变异系数为 0.42。同样地表层(0—20 cm)土壤大孔隙平均密度大小顺序为:针阔混交林>落叶阔叶林>华山松林>油松林;0—60 cm 土层,大小顺序则为针阔混交林>华山松林>落叶阔叶林>油松林。针阔混交林地土壤大孔隙密度最大。0—60 cm 土层的大孔隙平均密度的变异系数大小顺序为:针阔混交林>华山松林>落叶阔叶林>油松林。土壤大孔隙断面面积与土柱总过水断面面积的百分比(简称大孔隙面积比)能够综合反映大孔隙半径及密度等因素对土壤水分运动的影响。各样地大孔隙面积比平均为 4.59%,标准差为 2.81%,变异系数为 0.61。大孔隙面积比最高的为油松林地的 A 层,较小的为

油松林的 C 层和华山松林的 C 层。0—60 cm 土层大孔隙平均面积比的顺序为:针阔混交林>油松林>落叶阔叶林>华山松林。油松林地的大孔隙面积比较大可能是土壤中砾石分布影响较大半径大孔隙密度的缘故;华山松林地砾石含量较低且质地较黏重,可能对大孔隙的发育有一定限制。针阔混交林和落叶阔叶林的土壤大孔隙平均密度和面积比的变异系数均较大,这可能与该林分类型较为丰富的腐烂根系有一定关系,也可能是由于所处林地土壤表层镶嵌的石块以及底部散布的砾石所致。不同类型林地、不同土壤层中大孔隙密度变化具有较大差异,说明植物组成对土壤大孔隙特征具有较为显著的影响。

2.2 大孔隙垂直分布规律

随着林地土壤深度的增加,地表植物根系能够

作用到的范围逐渐缩小,植物对土壤结构的影响程度也逐渐降低^[20]。缺少了植物根系的挤压与切割以及腐根对土体的疏松,林地底层的土壤一般会较其上层变得更加紧实,从而影响着土壤大孔隙的形成。各林地土壤层中,较大孔径孔隙的密度较小,而较小孔径孔隙的密度较大,且各当量孔径的大孔隙密度随土层分布基本表现为上层大、下层小的特点(表2)。采用新复极差法的多重比较统计($P < 0.05$)对不同林分不同土层深度中各当量孔径的大孔隙密度进行分析,表明随林地土壤深度增加,各级别大孔隙的数量整体呈显著下降趋势(表3)。林地土壤表层,当量孔径0.5—3.8 mm范围内的大孔隙密度明显高于底层。林地表层土壤中,当量孔径为2.0—3.8 mm的平均大孔隙密度在135—768个/m²之间,而底层仅为45—121个/m²。该孔径级别土壤大孔隙的形成可能与植物根系腐烂后形成的孔径较大的植物根孔有关^[21]。当量孔径为0.5—2.0 mm的大孔隙,在表层土壤中的平均数量可达到4522个/m²。地被物中灌木、草本植物的浅层根系的腐烂与

生长是植物根孔更新形成的主要来源,因此当量孔径较大的大孔隙多在土壤表层范围内聚集^[21]。当量孔径为0.3—0.5 mm的大孔隙密度在相邻土层间变化不显著,说明数量最多的低孔径大孔隙在林地土壤中的空间分布状态是较为均匀的。对各当量孔径的大孔隙密度与对应有机质含量进行相关分析,二者具有极显著的正相关性($P < 0.01$)(表4),表明有机质对大孔隙的形成有重要作用,对较大孔径孔隙的作用尤为明显。土壤有机质具有一定的粘结力,能够使相对松散的土壤颗粒通过有机质自身的胶结作用形成团粒结构。森林枯枝落叶分解和根系腐烂导致表层土壤有机质含量增加,土壤团聚体增多,相应地土壤孔隙率增大、孔隙尺度增大、连通性变好。Tsukamota^[1]研究发现单个大孔隙通常较短,但通过土壤松散有机物质的节点连接,可形成大孔隙网络。Aubertin^[1]研究认为此类大孔隙可能至少占到森林土壤体积的35%,但会随土层的加深而迅速减小。

表3 大孔隙密度随土壤深度变化的差异显著性

Table 3 Significance of difference of macropore density in each soil depth

土壤层次 Profile	土壤大孔隙的当量孔径范围 Macropore radii intervals/mm					
	2.0—3.8	1.5—2.0	1.1—1.5	0.7—1.1	0.5—0.7	0.3—0.5
A	a	a	a	a	a	a
B	b	b	b	b	b	ab
BC	c	c	c	c	c	bc

同列不同小写字母间差异达到显著($P < 0.05$)水平

表4 有机质含量与不同当量孔径大孔隙密度的相关关系

Table 4 Correlation analysis between the number of macropores and organic matter for each pore size

参数 Correlation	大孔隙当量孔径 Macropore radii intervals/mm					
	0.3—0.5	0.5—0.7	0.7—1.1	1.1—1.5	1.5—2.0	2.0—3.8
相关系数 Spearman correlation coefficient	0.753 **	0.842 **	0.857 **	0.854 **	0.889 **	0.926 **
显著性(双侧) Two-tailed significances	0.007	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000

** $P < 0.01$

2.3 大孔隙对饱和和导水率的影响

土壤层的饱和和导水率是由不同类型不同性质的水分运移路径所决定的,而土壤大孔隙是其中一种重要的路径表现形式^[1,22]。对各土层不同当量孔径的大孔隙密度和土壤饱和导水率进行相关分析(表5),发现当量孔径为0.3—0.5 mm的大孔隙密度对饱和导水率具有显著的影响($P < 0.05$)。由于不同林地不同土层内该级别大孔隙的数量最大且变化差异

较小,因此整体上其对饱和和导水率空间变化的影响程度较低。当量孔径为0.5—3.8 mm的大孔隙密度对饱和和导水率的影响极显著($P < 0.01$),加之其在不同林分、不同土层中数量变化较大(表2),因此其对饱和和导水率的空间变化影响程度较高。大孔隙面积比与饱和导水率显著相关($P < 0.05$)也反映了大孔隙孔径与密度分布共同影响土壤水分运移。随孔径降低,大孔隙密度与饱和导水率的相关程度逐渐降低,

说明土壤中水分传导特性与大孔隙孔径特征具有密切联系。油松林地土壤表层(0—20 cm)丰富的根系石砾分布所形成的较大孔径的孔隙使其具有较强的导水性能;针阔混交林地底层(40—60 cm)的破碎基

岩是其具有较好深层导水能力的重要原因。大孔隙的水分传导作用也是各土层不同径级大孔隙在土壤水分、质地和寄生生物等因素影响下相互作用、相互贯通的过程。

表 5 饱和导水率与不同当量孔径大孔隙密度的相关关系

参数 Correlation	大孔隙当量孔径 Macropore radii intervals/mm						面积比/% Macropore area ratio
	0.3—0.5	0.5—0.7	0.7—1.1	1.1—1.5	1.5—2.0	2.0—3.8	
相关系数 Spearman correlation coefficient	0.704 *	0.814 **	0.809 **	0.823 **	0.834 **	0.871 **	0.673 *
显著性(双侧) Two-tailed significances	0.016	0.002	0.003	0.002	0.001	0.000	0.023

** $P<0.01$; * $P<0.05$

进一步研究大孔隙对水分运动影响,对当量孔径 $>1.5\text{mm}$ 大孔隙密度与饱和导水率进行回归分析,发现孔径 $>1.5\text{mm}$ 的大孔隙密度与饱和导水率呈幂函数关系,且拟合度较高(图 1)。孔径 $>1.5\text{mm}$ 的大孔隙密度仅占总大孔隙密度的 5.37%,但决定了饱和导水率 84.4%的变异。Beven 等^[1]认为较大孔径的孔隙可有效排走土壤中的空气,减小了气压对入渗的抑制;大孔隙也增加了侧向渗透和垂直下渗,从而影响导水率的变化。在考虑大孔隙存在时,土壤中水分运移主要由通过大孔隙中的水流决定,特别是在土壤接近饱和的情况下,大孔隙中的水流速度远大于土壤基质流,是非达西流^[1,16]。Peterson^[1]等测量孔径 $>3\text{mm}$ 的某单一孔隙出流时,发现其雷诺数达到 3000,为湍流;有的大孔隙可增加水流量,从 1.7 到 $2.8\times 10^{-5}\text{m/s}$,孔隙率却仅增加了 0.002%。林地土壤较大孔径的孔隙主要分布在表层(表 2),所以更有利于土壤对降水的吸收与存蓄。

林区土壤平均大孔隙率在 1.6%—13.3%之间。饱和导水率随着大孔隙率的增加呈幂函数增大;进

一步研究也发现饱和导水率先随大孔隙率的增加而增大,到一定程度反而下降,呈抛物线型变化,且拟合度也达到了 0.81。但在大孔隙体积所占比例小于 5%时,均表现为饱和导水率随大孔隙体积比增大而升高的趋势(图 2)。分析其原因,可能是大孔隙体积比增大到一定程度时,决定其排水能力的主要因素转为大孔隙联通性和水流形态,而非其数量的多少^[15]。大孔隙率的微小变化会引起水流通量的突变,其流态可能是层流,也可能是介于层流与紊流之间的过渡流。水流在不规则大孔隙网络中倾向于颈缩效应^[1]。Beven 和 Germann 研究发现土壤样品中连续且直径为 0.3 mm 的大孔隙要比周围不连续的直径为 100 mm 的孔隙传导更多的水分。土壤中的垂直大孔隙受到植物根系、动物活动和土壤结构等因素的影响,其间往往不是联通的,存在着断孔和死孔。虽存在土壤有机物质的节点连接^[8],但其作用有限,并且随土层加深大孔隙密度也显著减小(表 2),从而影响着对水分的传导。

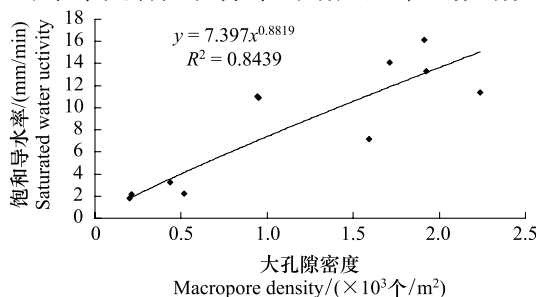


图 1 孔径 $>1.5\text{mm}$ 的大孔隙密度与饱和导水率的关系

Fig.1 The relationship between density of soil macropore $>1.5\text{mm}$ and saturated water conductivity

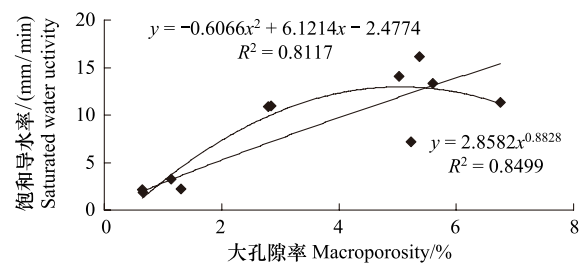


图 2 大孔隙率与饱和导水率的关系

Fig.2 The relationship between macroporosity and saturated water conductivity

3 结论与讨论

本研究得出秦岭南坡中山带水源林区土壤大孔隙当量孔径集中于 0.3—3.8 mm, 与以往定义范围基本一致, 但孔径范围上限较大, 这可能与该区石砾含量较大并广泛分布着基岩碎屑和破碎岩石有关, 且林区植被的腐根对较大孔径的大孔隙形成也起重要作用^[23]。根系腐烂不仅有助于提高土壤有机质, 促进团聚体的形成; 也为新根的伸延提供了有效通道。多数情况, 石砾与植物根系交织在一起, 共同影响大孔隙的发育以及土壤水分运动。土壤大孔隙的形成因素较为复杂, 若需获得更为全面的了解, 则需要定量区分各个因子的作用。

>0.3 mm 的各当量孔径大孔隙密度与饱和导水率均显著相关, 这与王伟等^[18]研究结果基本一致。石辉等^[15]在研究岷江上游森林土壤大孔隙特征时, 发现孔径大于 1.4 mm 的孔隙数量对饱和导水率影响最大, 可以决定饱和导水率 69% 的变异。本研究中, 当量孔径 >1.5 mm 的大孔隙密度较小, 但决定了饱和导水率 84.4% 的变异。孔径较大 (当量孔径为 1.5—3.8 mm) 的大孔隙, 在实验林区不同类型林地土壤中广泛分布, 加之该类型大孔隙的水力传导性能较强, 对饱和导水率的变化影响程度也较高。一定条件下大孔隙的连通性对水分的入渗起主导作用^[24]。但因技术原因, 本研究未考虑孔隙联通性, 在今后研究中需加强技术研发, 予以综合考虑。

总体上, 研究区针阔混交林和落叶阔叶林土壤大孔隙平均密度和面积比较大, 因此, 针阔混交林和落叶阔叶林较利于改良土壤渗透性, 具有较好的涵养水源和调节径流的功能。影响流域水分运动的因素很多, 除植被类型和土壤外, 也包括降雨、地质和地形等^[25]。以往研究中, 很少讨论当降雨强度处于那个范围时, 更有利于大孔隙传导水分; 是否大孔隙度越大, 导水性越好, 还是存在上下限。此外, 未来还需进一步讨论大孔隙的变异性和有效性, 为水源林区水文生态理论的完善和模型的构建提供参考。

References:

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [2] Noguchi S, Tsuboyama Y, Sidle R C, Hosoda I. Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1413-1423.
- [3] Wilson G V, Jardine P M, Luzmoore R J, Jones J R. Hydrology of a forested hillslope during storm events. *Geoderma*, 1990, 46(1/3): 119-138.
- [4] Shipitalo M J, Dick W A, Edwards W M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(3/4): 167-183.
- [5] Weiler M, Naef F. Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow. *Journal of Hydrology*, 2003, 273(1/4): 139-154.
- [6] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70(2): 131-140.
- [7] Luxmoore R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(3): 671-672.
- [8] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, Yu P T, Xiong W, Xu D P. Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2675-2680.
- [9] Liu W, Qu Z Q, Ying P F. Soil macropore and its studying methodology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 465-468.
- [10] Bouma J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 1991, 46: 1-39.
- [11] Zehe E, Flüßler H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(1/2): 100-115.
- [12] Li J Z, Pei T F, Niu L H, Li X Y. Simulation and model of interflow on hillslope of forest catchment. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(4): 2-8.
- [13] Zhang S L, Lei R D, Lü Y L, Ma Y. Water-balance of forest ecosystem in Huoditang area of Qinling mountain. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(6): 18-22.
- [14] Bronstera A, Plate E J. Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. *Journal of Hydrology*, 1997, 198(1/4): 177-195.
- [15] Shi H, Chen F Q, Liu S R. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang Rive. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 507-512.
- [16] Li W L, Jin C J, Wang A Z, Pei T F, Guan D X. Amount and vertical distribution of macropores in forest soils in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1213-1218.
- [17] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 556-559.
- [18] Wang W, Zhang H J, Cheng J H, Wu Y H, Du T C, Wang Y.

- Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of simian mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [19] Zhu Z X. *Pedology*. Beijing: Agriculture Press, 1983.
- [20] Wang D L, Yin C Q. Functions of root channels in the soil system. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 869-874.
- [21] Gish T J, Gimenez D, Rawls W J. Impact of roots on ground water quality. *Plant and Soil*, 1998, 200(1): 47-54.
- [22] Cheng J H. Research on the model of Preferential Flow in the Woodland of Granite Region Three Gorges of Yangze River [D]. Beijing: Beijing Forestry University Doctoral Dissertation, 2005.
- [23] Shi H, Liu S R. The Macroporosity properties of forest soil and its eco-hydrological significance. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(5): 533-539.
- [24] Wu J Q, Zhang J F, Gao R. Physical simulation experiments of effects of macropores on soil water infiltration characteristics. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10): 13-18.
- [25] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X, Kihgaoefr E. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: a review. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 79-84.
- [9] 刘伟, 区自清, 应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 465-468.
- [12] 李金中, 裴铁璠, 牛丽华, 李晓宴. 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究. *林业科学*, 1999, 35(4): 2-8.
- [13] 张胜利, 雷瑞德, 吕瑜良, 马玉. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究. *水土保持通报*, 2000, 20(6): 18-22.
- [15] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响. *生态学报*, 2005, 25(3): 507-512.
- [16] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 裴铁璠, 关德新. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2179-2154.
- [18] 王伟, 张洪江, 程金花, 吴煜禾, 杜士才, 王冉. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [19] 朱祖祥. *土壤学(上册)*. 北京: 农业出版社, 1983.
- [20] 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): 869-874.
- [22] 程金花. 长江三峡花岗岩区林地坡面优先流模型研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [23] 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.
- [24] 吴继强, 张建丰, 高瑞. 大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟试验. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 15-17.
- [25] 张志强, 王礼先, 余新晓, Kihgaoefr E. 森林植被影响径流形成机制研究进展. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 79-84.
- 参考文献:**
- [8] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 于澎涛, 熊伟, 徐大平. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2675-2680.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 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工作者,探索生态学奥秘,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,280 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

本期责任副主编 薛建辉

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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