

桂北地区土地利用类型对土壤饱和导水率和持水能力的影响研究

覃 淼¹, 翟禄新², 周正朝¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119; 2. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:土壤饱和导水率和田间持水量是土壤重要的物理性质,也是表征土壤入渗性能和土壤持水性能的重要参数之一。通过测定桂北地区不同土地利用类型的土壤饱和导水率和田间持水量,探究土地利用类型对土壤饱和导水率和持水能力的影响。结果表明:不同的土地利用类型下,土壤饱和导水率存在明显的差异性,饱和导水率从大到小依次为农田、天然林、人工林、人工草地、桉树林,饱和导水率的误差范围从大到小依次为:农田、人工林、人工草地、桉树林、天然林;不同的土地利用类型对土壤田间持水量的影响也不同,土壤的田间持水量从大到小依次为:天然林、桉树林、人工林、人工草地、农田,天然林的持水性能相对最好;相对于土壤有机质含量,土壤孔隙度对土壤饱和导水率的正向影响更大,而在一定范围内,土壤有机质含量增加有利于提高土壤持水性能。

关键词:桂北地区;土地利用类型;饱和导水率;持水性能

中图分类号:F301.24;S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0028-05

Influence of Land Use Types on Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Water Retention in Northern Guangxi

QIN Miao¹, ZHAI Luxin², ZHOU Zhengchao¹

(1. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. College of Environmental Science and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Soil saturated hydraulic conductivity and soil field capacity can be used to characterize physical properties of soil, and are also the vital parameters describing soil water infiltration and soil water retention. In this study, the soil saturated hydraulic conductivity and soil field capacity of various land use types in the northern Guangxi areas were measured to investigate the effects of different land use types on soil saturated hydraulic conductivity and soil water retention. The results showed that the variations in soil saturated hydraulic conductivity over different land use types displayed significant differences. The soil saturated hydraulic conductivity declines sequentially in farmland, natural forestland, artificial forestland, artificial grassland and eucalyptus forestland and the error range of the soil saturated hydraulic conductivity dropped in the order of farmland, artificial forestland, artificial grassland, eucalyptus forestland and natural forestland. Furthermore, the soil field capacity is also different under the distinct conditions of the land use types. The soil field capacity in diversified land use types aligned with the set in natural forestland, eucalyptus forestland, artificial forestland, artificial grassland and farmland, of which the soil water retention of the natural forestland is even pronounced. Compared with the soil organic matter content, the soil porosity presents the more positive influence on the soil saturated hydraulic conductivity. However, the soil organic content facilitates the soil water retention under the limited conditions.

Keywords: northern Guangxi; land use types; saturated hydraulic conductivity; soil water retention

收稿日期:2014-07-31

修回日期:2014-09-05

资助项目:国家自然科学基金项目“漓江流域上游区气候和植被变化的生态水文响应机制研究”(41261005);广西教育厅面上项目“近 50 年来广西气候变化及其水文响应”(201012MS028);霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目“黄土高原小流域土壤侵蚀动态对气候变化的非线性响应”(131025);陕西省青年科技新星项目“黄土高原草被控制坡沟系统径流侵蚀动力机制及有效性研究”(2014kjxx-52);广西师范大学重点项目“珠江流域气候变化及其水文要素响应预研究”(2010ZD009)

第一作者:覃淼(1991—),男,广西北流人,硕士研究生,研究方向为水土资源评价与规划。E-mail:qinmiao@snnu.edu.cn

通信作者:周正朝(1980—),男,四川泸州人,博士,副教授,主要从事植物生态和土壤侵蚀研究。E-mail:zhouzhengchao@126.com

饱和导水率(K_s)是指土壤全部孔隙都充满水的情况下,在单位水势梯度作用下,通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流通量或渗流速度^[1]。土壤饱和导水率是表征土壤入渗能力的重要参数,反映土壤涵养水源和抗侵蚀能力的重要指标^[2],它综合反映了多孔介质对某种流体在其中流动阻碍作用^[3]。土壤入渗能力与土壤性质、土壤初始含水率、地形状况以及下垫面因素等有密切的关系^[4]。田间持水量则是土壤自然状态下最大的含水量,是衡量土壤保水性的一个指标^[5],其大小受到容重、孔隙度和有机质含量等多种土壤理化性状的影响^[6-7]。

目前不同土地利用类型入渗和持水性能研究多集中在黄土高原区^[8]、川中丘陵区^[9]及三峡库区^[10-11]等地区,对桂北地区研究则鲜有报道。桂北地区处于西南岩溶地貌发育地区,生态脆弱,土层薄,石漠化现象严重^[12];此外桂北地区是漓江水源的补给地,而桂北地区降雨季节不均衡,冬旱夏汛^[13-14],研究不同土地利用类型对土壤入渗能力和持水能力的影响,对缓解区域石漠化、调节降雨时间分配有重大意义。本研究通过研究桂北地区不同土地利用类型下土壤表层导水率和田间持水量,分析不同土地利用类型的土壤饱和导水率和田间持水量及其与土壤各成分及结构之间的关系,揭示土地利用类型对土壤入渗和持水特性的影响规律,旨在桂北地区保持水土、提高土壤水分生产力、改善生态环境提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于广西壮族自治区桂北地区的猫儿山、桂林市雁山镇和桂林市七星区朝阳乡3个小区。其地理位置为 $109^{\circ}36'35''$ — $111^{\circ}29'12''$ E, $24^{\circ}15'23''$ — $26^{\circ}23'19''$ N,属中亚热带季风气候,年平均降雨量1 949 mm,但年内降水分布不均匀,多集中在4—8月,年平均气温为 18.8°C 。其中,猫儿山以常绿阔叶林为主的自然森林植被生长茂盛,森林覆盖率高,地表水系十分发达,土壤矿物分解较彻底,主要植被类型为原始森林、杉树林、毛竹林等;雁山镇农田和林地交错分布,其主要植被类型为桉树林、松树林、西瓜地和板栗林等;桂林七星区朝阳乡主要以农田和建设用地为主,其植被类型为菜地、草地、柏树林、柑橘林等。

为了获取较为真实可靠的数据,进行野外实地考察,在3个试验区域中选取具有代表性的21个试验点(表1)。

1.2 研究方法

1.2.1 饱和导水率测定 采用德国 UGT 公司 IL-2700 罩式入渗仪测量各试验点土壤表层不同张力值下的饱和导水率。罩式入渗仪在不破坏土壤结构情况下,可实地测量上至土壤发泡点的土壤导水率,其测量方法和结果较为可靠^[15]。土壤饱和导水率由 GARDNER 公式^[16]计算:

$$k_u = k_s \cdot \exp(\alpha h) \quad (1)$$

式中: k_u —— h 水压势下的实测导水率; k_s ——饱和导水率; α ——待定指数系数; h ——水压势。1968 年 WOODING^[17]改进的方法适合稳定态流,可通过一个圆形渗透面积扩展到整个无穷大面积,其土壤饱和导水率的计算为:

$$Q = \pi a^2 k_u \left(1 + \frac{4}{\pi \alpha a}\right) \quad (2)$$

在两个不同张力值 h_1, h_2 测定下,得到 $\alpha = \frac{\ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{h_1 - h_2}$, $h_1, h_2 < 0$;

通过式(3),(4),(5)可以计算出土壤的饱和入渗率:

$$Q = \pi a^2 v_B = \pi r_s^2 \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{Q}{\pi a^2} = v_B = \frac{r_s^2}{a^2} \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = q \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (4)$$

$$k_u = \frac{\frac{Q}{\pi a^2}}{1 + \frac{4}{\pi \alpha a}} = \frac{q \frac{\Delta A}{\Delta t}}{1 + \frac{4}{\pi \alpha a}} \quad (5)$$

式中: A ——马里奥特瓶内水柱高度; a ——入渗罩内半径; r_s ——马里奥特瓶内半径; q ——马里奥特瓶内横截面积与入渗罩入渗面积的比值; v_B ——土壤入渗率。

1.2.2 土壤干容重和孔隙度测定 土壤干容重(γ)用环刀烘干法测量,孔隙度(P)利用换算法,换算公式 $P = (1 - \gamma/D) \times 100\%$,比重 D 取 2.65 g/cm^3 。

1.2.3 土壤田间持水量(FC)测定 将环刀浸入水中泡 12 h 以上,取出用滤纸包好环刀底面放在干沙 8 h 后称重(m),减去干容重(γ)即可求得,计算公式 $FC = (m - \gamma)/\gamma \times 100\%$ 。

1.2.4 土壤有机质测定 随机选取各试验点 3 处表层土壤均匀搅拌并带回实验室采用“重铬酸钾容量—外加热法”测定土壤有机质含量(SOM)。

1.3 数据分析

使用 SPSS 18.0 数学统计软件对土壤的饱和导水率(K_s)、田间持水量(FC)、孔隙度(P)、有机质含量(SOM)之间进行回归拟合。

表 1 试验点基本情况

编号	地点	植被类型	土地利用类型	经纬度	高程/m	土壤质地	周边植被情况
1	猫儿山	原始森林	天然林	110°26.065'E 25°53.816'N	1993	淤泥土	原始南方铁杉,有次生树种
2	猫儿山	杜鹃树林	天然林	110°27.990'E 25°54.359'N	1475	粘壤土	大量高约 3~5 m 的杜鹃树
3	猫儿山	杉树林	天然林	110°29.249'E 25°53.068'N	1150	砂壤土	大量高约 5~7 m 的杉树
4	猫儿山	毛竹林	人工林	110°28.981'E 25°51.655'N	438	砂壤土	林下较多铁芒萁
5	猫儿山	毛竹杉树 混交林	人工林	110°28.717'E 25°51.941'N	500	砂壤土	毛竹与杉树的数量比例大致为 1:1
6	猫儿山	毛竹林	人工林	110°28.407'E 25°51.540'N	487	砂壤土	地表以竹叶枯落物为主
7	雁山镇	桉树林	桉树林	110°18.069'E 25°02.692'N	170	砂土	林下杂草较多
8	雁山镇	桉树林	桉树林	110°15.536'E 25°07.865'N	161	黏土	林分单一,少量灌木,草本
9	雁山镇	桉树林	桉树林	110°15.553'E 25°07.952'N	160	砂壤土	周围较多灌木丛,少量马尾松
10	雁山镇	桉树林	桉树林	110°15.845'E 25°07.830'N	149	黏土	周围少量樟树、草本植物丰富
11	雁山镇	松树林	人工林	110°17.759'E 25°02.330'N	162	黏土	林龄大,周围有菜地
12	雁山镇	松树林	人工林	110°15.801'E 25°07.0990'N	149	黏土	马尾松林,林下有大量灌木
13	雁山镇	西瓜地	农田	110°17.897'E 25°02.613'N	168	扰动土	西瓜处于幼苗期
14	雁山镇	板栗林	人工林	110°17.270'E 25°06.267'N	163	黏土	林下少量杂草、落叶
15	朝阳乡	杂树林	人工林	110°19.624'E 25°15.968'N	178	黏土	林下杂草较多
16	朝阳乡	菜地	农田	110°20.101'E 25°16.216'N	148	扰动土	土壤新扰动,略有杂草
17	朝阳乡	草地	人工草地	110°19.481'E 25°15.951'N	178	扰动土	向阳的人工草地,草地上有蒲葵、 柏树
18	朝阳乡	草地	人工草地	110°19.472'E 25°15.966'N	170	砂壤土	人为扰动较少的草地
19	朝阳乡	柏树林	人工林	110°19.413'E 25°16.064'N	177	黏土	林下有较多杂草
20	朝阳乡	菜地	农田	110°19.572'E 25°16.055'N	152	扰动土	土壤新扰动,略有杂草
21	朝阳乡	草地	人工草地	110°19.426'E 25°16.053'N	175	扰动土	人工花圃,主要是苏铁及七里香

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型的土壤饱和导水率差异

土壤饱和导水率不仅受到区域性土壤特征的影响,不同植被类型长期影响土壤演化,对土壤饱和导水率也会造成一定的影响^[1]。为此,将试验点按照土

地利用类型分成天然林、人工林、农田、桉树林和人工草地 5 类进行土壤饱和导水率差异分析(图 1)。

如图 1 所示,从各土地利用类型的平均值分析,农田的土壤饱和导水率最大,达到 180.29×10^{-6} m/s;天然林次之,为 65.39×10^{-6} m/s;人工林为 60.32×10^{-6} m/s;人工草地为 37.07×10^{-6} m/s;桉

树林的土壤饱和导水率最低,仅为 $31.73 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。各土地利用类型的土壤饱和导水率差异极显著 ($p < 0.01$),其平均值从大到小依次为:农田、天然林、人工林、人工草地、桉树林。而各土地利用类型土壤饱和导水率标准差从大到小依次为:农田 ($64.67 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、人工林 ($49.30 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、人工草地 ($25.11 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、桉树林 ($23.14 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)、天然林 ($16.23 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)。

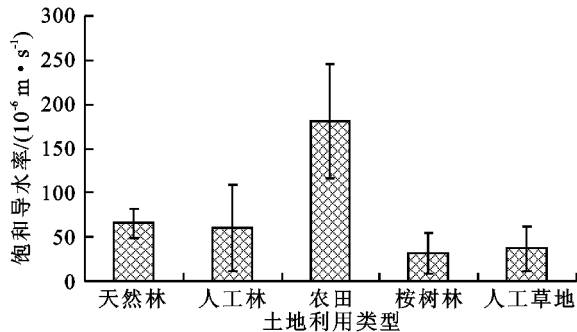


图1 不同土地利用类型的饱和导水率大小

农田属于经常耕作性的土地利用类型,表层土壤经常受到人为扰动,这有利于土壤水分入渗,但是由于农田中不同的植被类型受到的土壤扰动程度不同,因而导致其饱和导水率的变化明显。天然林有机质含量高,土壤孔隙度大,土壤人为扰动较少,水分易于土层中形成稳定渗流,其土壤饱和导水率变化较稳定。人工林与天然林同属林业用地,但其土壤孔隙度远小于天然林,导致水分在土层中较难入渗,同时其表层土壤受到的扰动小于农田,进而导致了人工林的土壤饱和导水率均小于天然林和农田。人工草地土壤人为扰动少,根系深度浅,枯落物少,改善土壤孔隙的能力有限,土壤饱和导水率偏小。桉树林的土壤饱和导水率最低,缘于其易造成土壤板结,土壤容重较高,导致了土壤入渗受到阻碍。这与赵筱青等^[18]的研究一致,桉树使土壤物理性质产生较大改变,土壤容重和土壤紧实度增加,土壤总孔隙度和毛管孔隙度减小。

2.2 土壤参数对饱和导水率的影响

将各土地利用类型的土壤饱和导水率(K_s)与孔隙度(P)、有机质含量(SOM)和田间持水量(FC)建立多元回归模型,得到式(6)关系。

$$K_s = -107.298 + 15.874P + 1.063SOM - 25.775FC \quad (6)$$

在 $\alpha = 0.05$ 的置信水平上, $F = 6.359$, 土壤饱和导水率与田间持水量、孔隙度和有机质含量之间的回归方程显著。拟合方程说明土壤孔隙度与有机质含量对土壤饱和导水率的影响均为正向的,土壤田间持水量对土壤饱和导水率的影响则是负向的,其中孔隙度的影响系数为 15.874,有机质含量的影响系数为

1.063,孔隙度对土壤饱和导水率的正向影响比有机质含量对土壤导水率的正向影响更大。

土壤饱和导水率是描述水分在重力作用下通过土壤孔隙的速度大小的一个物理量。由于通过土壤孔隙时水分在受到重力作用向下运动的同时也受到土壤颗粒的毛管吸力的阻碍作用,当水分的重力大于毛管阻力时,水分向土壤入渗;当水分的重力等于毛管阻力时,水分不会再向土壤入渗。而土壤孔隙越小,土壤颗粒之间接触越紧密,土壤颗粒的毛管吸力越大。所以土壤孔隙度越小,土壤饱和导水率就越小。拟合方程表明,有机质含量越高时,土壤饱和导水率越高。土壤有机质能够团聚土壤颗粒形成水稳性团聚体,进而影响土壤饱和导水率^[1]。

2.3 不同土地利用类型的土壤持水性能差异

田间持水量是指在田间自然属性状况下土壤所保持的最大持水量,是体现土壤保持水分的一种基本性质,同时田间持水量也为农业生产提供了指导的实践作用^[5]。田间持水量越大,土壤保持水分的性能越好。

由图2可以看出,各土地利用类型的土壤田间持水量差异极显著 ($p < 0.01$),其平均值从大到小依次为:天然林 (40.22%)、桉树林 (27.97%)、人工林 (27.70%)、人工草地 (25.75%)、农田 (22.85%)。而其标准差从大到小依次为:人工林 (6.27%)、天然林 (4.36%)、人工草地 (2.73%)、农田 (2.72%)、桉树林 (2.61%)。猫儿山中的天然林土壤田间持水量最高,1-原始森林、2-杜鹃树林、3-杉树林的田间持水量分别为 44.89%, 39.52%, 36.26%, 而孔隙度分别为 73.13%, 68.30%, 65.17%, 有机质含量分别为 161.75, 116.84, 45.18 g/kg, 孔隙度和有机质含量总体均处于较高水平。而猫儿山中的毛竹林等人工林地的持水量稍低,其中 4-毛竹林、6-毛竹林、毛杉混交林的田间持水量分别为 26.29%, 33.70%, 37.88%, 孔隙度分别为 49.62%, 61.62%, 65.09%, 与天然林的相差不大,但是有机质含量总体小于天然林,其分别为 52.85, 60.94, 78.47 g/kg, 天然林的有机质含量约是人工林地的两倍。猫儿山毛竹林等人工林地的平均田间持水量为 32.62%, 而猫儿山天然林的平均田间持水量为 40.22%。其他土地利用类型的土壤孔隙度和有机质含量均低于猫儿山天然林的土壤孔隙度和有机质含量,这说明天然林对于土壤水分具有较高的保持作用。

猫儿山是漓江、浔江、资江的发源地,天然林的保水作用对于流域水源涵养具有积极的作用。从各土地利用类型的田间持水量水平表明,若猫儿山能够整体恢复天然林,这将大大提高猫儿山土壤的持水性

能,且猫儿山通过天然林的良好持水作用,对流域水源涵养和流域生态景观有重要影响。

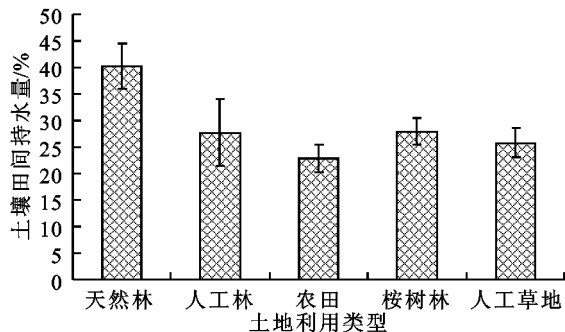


图2 不同土地利用类型的土壤田间持水量大小

2.4 土壤参数对持水性能的影响

对土壤田间持水量来说,其大小受到土壤孔隙度和土壤有机质含量等多种土壤理化性状的影响。将土壤田间持水量与土壤孔隙度、土壤有机质含量进行一元拟合(图3,4)。

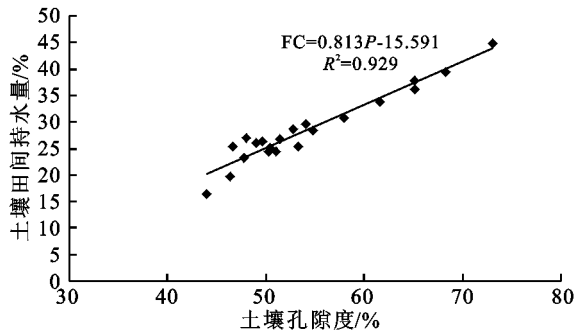


图3 土壤田间持水量与土壤孔隙度一元拟合

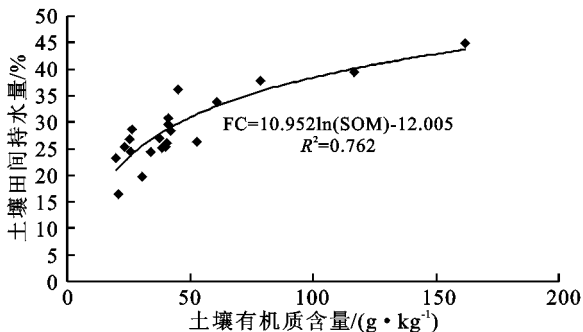


图4 土壤田间持水量与土壤有机质含量一元拟合

拟合方程说明土壤孔隙度与土壤有机质含量对田间持水量的影响均是正向的,当土壤的有机质含量相同时,土壤田间持水量主要取决于土壤中孔隙的多少与大小,在一定范围内,孔隙越少越小,土壤田间持水量就越少,该土壤的持水性能就越弱;当同一种土壤孔隙度相同时,土壤内部孔隙数量和大小确定,但是土壤有机质的吸水能力比土壤中矿物质的吸水能力要大,而这将影响土壤的持水量。有机质含量越多,土壤的吸水能力越大,土壤田间持水量就越大,土壤的持水性能就越好。从图4可以看出,土壤有机质含量对土壤田间持水量的影响存在一定的范围限制,

当土壤有机质含量在 100 g/kg 以下时,土壤田间持水量随着土壤有机质含量的增加而迅速增加;土壤有机质含量在 100 g/kg 以上时,土壤有机质含量对土壤田间持水量的影响增势逐渐减少,最终维持在一个比较稳定的状态。简而言之,当土壤孔隙度一定时,土壤有机质含量越大,土壤的持水性能越好,但土壤有机质含量对土壤持水性能的影响是有限的。

3 结论与讨论

(1) 不同的土地利用类型下,土壤的饱和导水率存在着明显的差异,饱和导水率从大到小依次为:农田、天然林、人工林、人工草地、桉树林,而饱和导水率的误差变化范围从大到小依次为:农田、人工林、人工草地、桉树林、天然林;不同的土地利用类型对土壤田间持水量的影响也不同,土壤的田间持水量从大到小依次为:天然林、桉树林、人工林、人工草地、农田,天然林的持水性能相对最好。

(2) 土壤孔隙度对土壤饱和导水率的正向影响比土壤有机质含量对土壤饱和导水率的正向影响更大;而土壤孔隙度与土壤有机质含量对田间持水量的影响也均为正向,当土壤孔隙度一定时,土壤有机质含量越大,土壤的持水性能越好,但是土壤有机质含量对土壤持水性能的影响是有限的。

参考文献:

- [1] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.
- [2] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].中国农学通报,2008,24(7):494-499.
- [3] 樊艺峰.土壤饱和导水率研究现状分析[J].山西水利,2011,27(5):43-44.
- [4] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [5] 杨欣坤,王宇,赵兰坡,等.土壤水动力学参数及其影响因素研究进展[J].中国农学通报,2014,30(3):38-43.
- [6] 李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特石漠化过程对土壤水分特性的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):198-203.
- [7] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [8] 纳磊,张建军,朱金兆,等.晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究[J].水土保持研究,2008,15(3):69-73.
- [9] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2014,28(1):53-57.

- [5] 官少飞,郎青,张本. 鄱阳湖水生植被[J]. 水生生物学报,2005,11(1):9-21.
- [6] 徐德龙,熊明. 鄱阳湖水文特性分析[J]. 人民长江,2001,32(2):21-22.
- [7] Zhong L, Deng J, Song Z, et al. Research on environmental impacts of tourism in China: Progress and prospect[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(11):2972-2983.
- [8] 刘世栋,高峻. 旅游开发对上海滨海湿地植被的影响[J]. 生态学报,2012,32(10):2992-3000.
- [9] Newsome D, Moore S A, Dowling R K. Natural Area Tourism: Ecology, Impacts and Management [M]. Bristol, UK: Channel View Publications, 2012.
- [10] Hall C M, Page S J. The Geography of Tourism and Recreation: Environment, Place and Space[M]. London: Routledge, 2002.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] Naeem S, Duffy J E, Zavaleta E. The functions of biological diversity in an age of extinction[J]. Science, 2012, 336(6087):1401-1406.
- [13] Bai J, Xiao R, Zhang K, et al. Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 450:244-253.
- [14] Tromp K, Lima A T, Barendregt A, et al. Retention of heavy metals and poly-aromatic hydrocarbons from road water in a constructed wetland and the effect of de-icing[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 203:290-298.
- [15] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] Mace G M, Norris K, Fitter A H. Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2012, 27(1):19-26.
- [17] Zhao M F, Xi J C, Ge Q S. Dynamic response of water quality change in the Liupan Mountain eco-tourism area to the human-induced tourism disturbance[J]. Resources Science, 2011, 33(9):1815-1821.
- [18] Buckley R. Tourism and environment[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2011, 36:397-416.
- [19] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367):49-56.
- [20] Banuelos G S, Ajwa H A. Trace elements in soils and plants: An overview[J]. Journal of Environmental Science & Health: Part A, 1999, 34(4):951-974.
- [21] McGown A. Soil properties and behaviour[J]. Engineering Geology, 1975, 9(3):275.



(上接第32页)

- [10] 王云琦,王玉杰. 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(3):102-108.
- [11] 马晓刚,张兵,史东梅,等. 丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5):25-29.
- [12] 胡业翠,刘彦随,吴佩林,等. 广西喀斯特山区土地石漠化:态势、成因与治理[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):96-101.
- [13] 陈余道,蒋亚萍,朱银红. 漓江流域典型岩溶生态系统的自然特征差异[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3):326-332.
- [14] 王金叶,李海防,段文军,等. 漓江上游典型森林群落内外降雨特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1):56-59.
- [15] Schwärzel K, Punzel J. Hood infiltrometer: A new type of tension infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5):1438-1447.
- [16] Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4):228-232.
- [17] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond[J]. Water Resources Research, 1968, 4(6):1259-1273.
- [18] 赵筱青,和春兰,许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11):1810-1816.