

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

目 次

综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵 林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周 俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖 丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林 青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王 曦 曹亚澄 韩 勇等 (558)
- ¹³C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ···· 刘 萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈 恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入¹⁵N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ····· 赵 伟 梁 斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周 兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ····· 曹晨亮 王 卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张 凯 郑 华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡 璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏 昕 石 坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董 智等 (706)

信息

- 2015国际土壤年 ····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像（由张中彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201406240321

喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征*

付同刚^{1, 2, 3} 陈洪松^{1, 2†} 王克林^{1, 2}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

(2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 土壤剖面饱和导水率 (Saturated hydraulic conductivity, K_s) 的垂直分布对土壤水文过程有极其重要的影响, 但在地质背景特殊的喀斯特地区其研究还相对匮乏。通过测定典型喀斯特小流域内 23 个土壤剖面 (0~10、10~20、20~30、30~50、50~70、70~100 cm) 土壤 K_s 及土壤碎石含量 (Rock fragment content, RC)、容重 (Bulk density, BD)、毛管孔隙度 (Capillary porosity, CP)、非毛管孔隙度 (Non-capillary porosity, NCP)、土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 等土壤性质, 并结合各样点的坡位 (Slope position, SP)、坡度 (Slope gradient, SG)、坡向 (Slope aspect, SA)、裸岩率 (Bare rock, BR)、土地利用类型 (Land-use type, LU) 等环境因素, 应用偏相关分析和典范对应分析 (CCA) 的方法, 研究了喀斯特小流域 K_s 的垂直分布特征及其主要影响因素。结果表明, K_s 随土壤深度的增加而减小并可用对数函数模拟 ($R^2=0.848$)。20~100 cm 各层 K_s 变幅较小且变异接近, 因此在水文模型中可用 20~30 cm 土壤 K_s 代替深层。土壤性质中, RC 与 K_s 的相关系数 (0.484) 最大。环境因素对 K_s 垂直分布的影响依次为 SP > SG > SA > LU > BR。由此可知, RC 是影响 K_s 最重要的土壤性质, 而 SP 则是影响 K_s 垂直分布最重要的环境因素。该结果有利于弄清喀斯特地区降雨入渗规律及其主要影响因素, 为小流域植被恢复及水文模型的构建提供科学依据。

关键词 饱和导水率; 偏相关分析; 典范对应分析

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

饱和导水率 (K_s) 是反映土壤入渗性能的重要物理指标, 同时也是水文模型中必不可少的参数, 因此受到国内外学者的广泛关注。一般认为, K_s 在空间上呈现出一定的结构性^[1-2]。有研究指出 K_s 存在明显的各项异性^[3], 而有的研究得出相反的结论^[4]。这些研究均重点关注表层土壤 K_s 的空间分异规律, 忽视了 K_s 随土壤深度的变异特征。 K_s 随土壤深度的增加, 表现出明显的差异性。姚淑霞等^[5] 通过对比不同类型沙地土壤 K_s , 发现不同类型的沙地 K_s 随土壤深度的变化趋势不同。彭舜磊等^[6] 研究了植物群落演替对土壤 K_s 的影响, 发现随土

壤深度的增加, 演替序列土壤 K_s 均呈现下降的趋势。这些研究关注了不同土地利用类型下土壤 K_s 垂直分布规律, 但并未深入探讨各环境因子对 K_s 垂直分布的影响。除环境因子外, K_s 还受土壤本身理化性质的影响。土壤碎石含量 (RC) 是影响土壤 K_s 的重要指标, 而 K_s 与 RC 的关系目前还存在较大争议。Sauer 和 Logsdon^[7] 的研究发现, K_s 随土壤 RC 的增加而增大, 而 Novák 等^[8] 得出相反的结论。也有研究指出 K_s 先随 RC 的增加而增加, 随后随 RC 增加而减小^[9]。此外碎石的风化程度也会对 K_s 产生影响^[10]。土壤容重 (BD) 对 K_s 的作用也存

*国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2015CB452703) 和国家自然科学基金项目 (41171187 和 51379205) 资助

†通讯作者: 陈洪松 (1973—), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与生态水文方面的研究工作。E-mail: hbchs@isa.ac.cn

作者简介: 付同刚 (1986—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要从事土壤水源涵养功能方面研究工作。E-mail: futonggang@126.com

收稿日期: 2014-06-24; 收到修改稿日期: 2014-12-27

在争议, Gwenzi等^[11]的研究发现 K_s 与BD呈负相关关系, 而Zhao等^[12]指出随BD的增加, K_s 也相应增大。土壤孔性是影响土壤 K_s 的重要因素, 梁向锋等^[13]利用逐步回归分析的方法得出土壤毛管孔隙(CP)是影响土壤 K_s 的重要因素, 而彭舜磊等^[6]用同样的方法得出非毛管空隙(NCP)是影响 K_s 的重要因素。土壤有机碳(SOC)也对土壤 K_s 有不可忽视的影响, 有研究发现 K_s 随SOC的增加而增大^[14], 而也有研究指出 K_s 先随SOC的增加而增大, 当达到一定程度后, 随SOC的增加而减小^[6]。虽然目前已存在较多关于 K_s 影响因素的研究, 但结果还存在一定差异, 主要影响因素还不明确。

喀斯特地区是世界上主要的生态脆弱带^[15]。由于特殊的地质背景, 喀斯特地区成土过程长, 成土速率慢, 土层浅薄且不连续, 土壤中碎石含量高^[16]。土壤储存降水、调蓄降水的能力低, 土壤稳定入渗率、近似饱和导水率高, 且大于大部分降雨强度^[17], 导致坡地地表径流系数小于5%^[18]。降水经土壤下渗到表层岩溶带, 而洞穴、竖井、地下河等地下水系统高度发育, 管道、裂隙普遍存在^[19-20], 使得表层岩溶带水文过程迅速^[21-22]。土壤覆盖在表层岩溶带上面, 土壤 K_s 的大小及分布规律直接影响表层岩溶带的水文过程。同时, K_s 还对喀斯特泉水流量峰值、时间等过程有很大影响^[23]。因此, 鉴于 K_s 对水文过程的重要性, 喀斯特地区也开展了部分 K_s 的相关研究。Li等^[24]研究了西班牙东南部喀斯特地区植被与碎石对土壤非饱和导水率的影响, 发现植被覆盖的土壤非饱和导水率要显著大于裸地及碎石覆盖的土壤。Chen等^[17]研究了桂西北喀斯特地区坡地近似饱和导水率, 并指出近似饱和导水率与碎石、坡度呈正相关关系。李孝良等^[25]对贵州喀斯特地区土壤 K_s 的研究发现土壤质地和土壤孔性是影响 K_s 的主要因素。但是, 已有研究均未关注 K_s 的垂直分布特征, 更未涉及在喀斯特地区特殊的背景下环境因素对 K_s 垂直分布的影响。因此, 急需对喀斯特小流域土壤 K_s 垂直分布特征及其影响因素进行深入研究。

本研究通过测定不同坡位、不同土地利用类型下剖面土壤 K_s , 结合土壤本身理化性质及各样点的环境因素, 研究了小流域土壤 K_s 垂直分布特征, 并深入探讨其影响因素, 以期对喀斯特地区植被恢复及流域水文模型的构建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站。地处环江县南部与宜州市接壤的大才乡境内(24°43'58.9" ~ 24°44'48.8" N, 108°18'56.9" ~ 108°19'58.4" E)(图1)。研究区面积1.14 km², 为典型的喀斯特峰丛洼地地貌类型, 海拔高度为272.0 ~ 647.2 m。洼地平均土层厚度50 ~ 80 cm, 坡地20 ~ 30 cm。试验站降雨充沛, 年均降雨量为1 389 mm, 但季节分配不均, 有明显的旱、雨季之分。雨季平均持续130 ~ 140 d, 降雨主要集中在4—9月, 尤以6月中旬至7月中旬最多, 可达50 ~ 460 mm。10月至次年3月为旱季, 各月平均降雨量在90 mm以下。地下水埋深受降雨量的影响较大, 雨季平均地下水埋深约为2 m, 旱季则大于3 m。小流域散布有4个表层岩溶泉, 且主要出现在坡脚, 其中2个仅雨季出流, 另外2个旱雨季均有出流。研究区年平均日照1 451 h, 日照时数以2月最低, 7月最高;日照率以3月最低, 9月最高。平均太阳总辐射量413.8 kJ cm⁻², 其中有效辐射量为211.9 kJ cm⁻², 平均气温19.9 °C。研究区居民1985年全部外迁, 耕地撂荒。2004年重新规划利用, 部分洼地、坡脚开垦为农田。灌草丛为主要的植被类型, 散布在整个小流域。乔木林面积较小, 多出现在基岩广泛出露的坡地。植被覆盖率较低, 多为喜钙、耐干旱的物种, 乔木以菜豆树(*Radermachera sinica*)、朴树(*Celtis sinensis*)、圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)等为优势种, 灌木以红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆(*Vitex negundo*)等为优势种, 草本优势种为五节芒(*Miscanthus floridulu*), 藤本以鹅掌藤(*Scheffera arboricola*)、铁线莲(*Clematis florida*)等为优势种。

2 研究方法

2.1 样点布设与样品采集

在小流域内, 按照不同坡位(上坡、下坡和洼地), 不同土地利用类型(乔木林、灌木林、灌草丛和农作物)布设23个样点。各样点均用手持GPS定位, 记录样点位置信息, 并导入等高线图(图1)。详细记录每个样点坡位(SP)、坡度(SG)、坡向(SA)、土地利用类型(LU)、

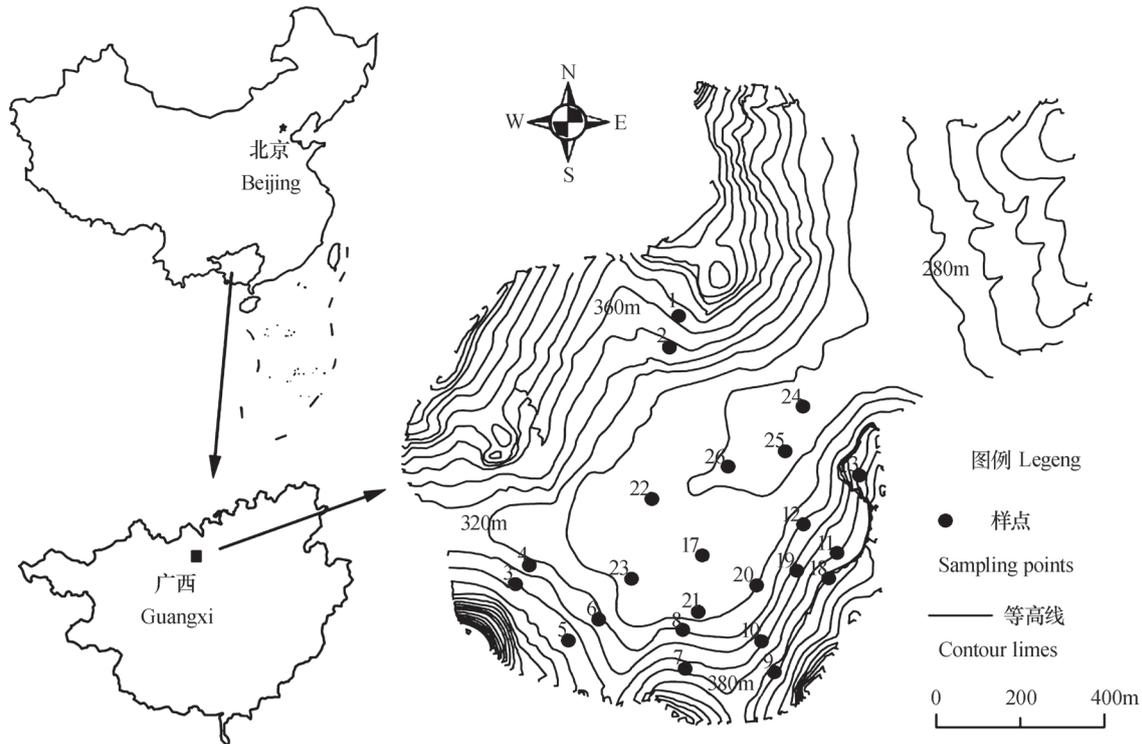


图1 研究区位置及样点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of sampling points in the area

裸岩率 (BR) 等环境信息。其中裸岩率按采样点周围 2 m 范围内基岩出露百分比计算^[26]。同时, 在每个样点分 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70、70 ~ 100 cm (土壤厚度不足 100 cm 时, 则挖到基岩为止) 采取原状土和扰动土样。原状土用直径 5 cm、体积 100 cm³ 的环刀采取 2 个重复, 扰动土用铁铲采取整层土壤。

2.2 分析方法

土壤原状土用来测定土壤 K_s 、BD、CP、NCP 和 RC 等土壤物理性质。 K_s 采用定水头法测定^[27-28]。BD 用烘干法测定, 孔隙度用吸水法测定^[29-30], RC 用碎石质量比土石总质量计算。扰动土用来测定 SOC, 测定方法为重铬酸钾外加热法^[31]。

2.3 数据处理

土壤物理性质的统计分析及其他理化性质的偏相关分析均在统计软件 PASW Statistics 18.0 中完成。各环境因子的 CCA 排序在国际通用软件 Canoco 4.5 中进行。排序之前, 将定性指标进行编码。坡位分三类, 1 表示上坡, 2 表示下坡, 3 表示洼地; 坡向分五类, 1 表示北坡, 2 表示东坡, 3 表示南坡, 4 表示西坡, 5 表示洼地; 土地利用类型分四类, 1 表示乔木林, 2 表示灌木林, 3 表示灌草

丛, 4 表示农作物。

3 结果

3.1 不同层次土壤 K_s 及其他理化性质

除 20 ~ 30 cm 外, K_s 随土壤深度的增加而减小, 二者之间的关系可以用对数函数模拟, R^2 达到 0.848 (图 2)。表层土壤 (0 ~ 10 cm) K_s 最大, 均值达到 8.72 m d⁻¹ (表 1), 显著大于 10 ~ 100 cm 各层。10 ~ 100 cm 各层 K_s 均值差异不显著, 20 ~ 100

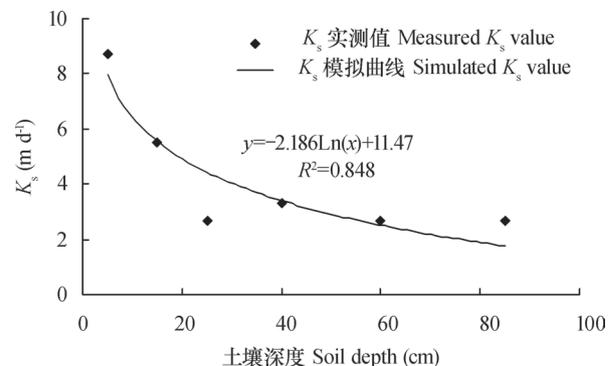


图2 饱和导水率随土壤深度的变化

Fig. 2 Variation of saturated hydraulic conductivity with soil depth

表1 不同土壤层次饱和和导水率及土壤理化性质的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of K_s and soil properties in different soil horizons
(SD stands for standard deviation and CV for coefficient of variance)

土壤性质 Soil properties	土层 (cm) Soil layer	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (m d^{-1})	0 ~ 10	29.81	<0.01	8.72a	6.96	0.80
	10 ~ 20	22.27	<0.01	5.51b	6.27	1.14
	20 ~ 30	11.75	<0.01	2.67b	3.36	1.26
	30 ~ 50	17.10	<0.01	3.34b	4.49	1.34
	50 ~ 70	14.52	<0.01	2.69b	4.15	1.55
容重 Bulk density (g cm^{-3})	70 ~ 100	12.63	<0.01	2.66b	3.92	1.48
	0 ~ 10	1.31	0.67	0.91d	0.14	0.15
	10 ~ 20	1.29	0.76	1.01c	0.16	0.16
	20 ~ 30	1.48	0.72	1.08c	0.19	0.17
	30 ~ 50	1.45	0.75	1.10bc	0.18	0.17
毛细孔隙度 Capillary proosity (%)	50 ~ 70	1.60	0.95	1.19ab	0.17	0.14
	70 ~ 100	1.64	0.98	1.25a	0.20	0.16
	0 ~ 10	65.49	25.22	52.88a	7.63	0.14
	10 ~ 20	57.74	36.16	49.06ab	5.32	0.11
	20 ~ 30	54.72	31.53	47.60b	5.49	0.12
非毛细孔隙度 Non-capillary proosity (%)	30 ~ 50	58.69	41.29	49.52ab	10.34	0.21
	50 ~ 70	57.38	26.26	45.86b	7.32	0.16
	70 ~ 100	80.18	33.02	47.22b	10.92	0.23
	0 ~ 10	17.17	4.24	8.81a	3.07	0.35
	10 ~ 20	13.24	0.60	6.93ab	3.72	0.54
碎石含量 Rock fragment content (%)	20 ~ 30	12.81	0.37	5.68bc	3.90	0.69
	30 ~ 50	12.94	0.75	4.21cd	3.47	0.82
	50 ~ 70	9.87	0.67	3.74d	2.82	0.75
	70 ~ 100	6.35	0.76	2.46d	1.55	0.63
	0 ~ 10	23.44	0.00	4.18a	6.32	1.51
土壤有机碳 Soil organic carbon (g kg^{-1})	10 ~ 20	28.83	0.00	4.67a	7.34	1.57
	20 ~ 30	35.24	0.00	4.44a	8.46	1.91
	30 ~ 50	60.72	0.00	7.85a	15.34	1.96
	50 ~ 70	45.47	0.00	8.06a	14.82	1.84
	70 ~ 100	45.35	0.00	11.68a	17.59	1.51
土壤有机碳 Soil organic carbon (g kg^{-1})	0 ~ 10	90.87	23.49	49.40a	16.46	0.33
	10 ~ 20	77.01	12.81	39.02b	18.14	0.46
	20 ~ 30	49.91	7.08	25.20c	11.75	0.47
	30 ~ 50	42.85	6.76	18.62cd	9.66	0.52
	50 ~ 70	79.88	2.15	16.242d	15.69	0.97
70 ~ 100	41.56	0.22	13.96d	12.08	0.87	

cm最大变幅仅为0.68 m d⁻¹。表层土壤K_s变异系数为0.80, 属于中等变异程度。其他各层土壤K_s的变异系数均大于1, 属于强变异程度。除70~100 cm外, K_s的变异系数随土壤深度的增加而增大, 表明K_s变异呈增大的趋势。

土壤BD随土壤深度的增加而增大, 表层土壤容重均值仅为0.91 g cm⁻³。各层土壤BD的变异系数在0.14~0.17之间, 均属于中等程度的变异。土壤CP在剖面上没有明显的分布规律, 而土壤NCP随深度的增加而减小。CP的均值在45.86%~52.88%之间, 远大于NCP的均值(2.46%~8.81%)。虽然CP和NCP的变异系数均在0.1~1之间, 属于中等程度的变异, 但NCP的变异系数(0.35~0.82)要大于CP(0.11~0.23)。除20~30 cm以外, 土壤RC随土壤深度的增加而增大, 但各层不存在显著性差异。各层的变异系数均大于1, 属于强

变异性。SOC随土壤深度的增加而减小, 表层均值达到49.40 g kg⁻¹, 显著大于其他各层。SOC的变异系数在0.33~0.97之间, 属于中等程度的变异, 且除70~100 cm以外, 随深度的增加变异增大(表1)。

3.2 K_s与土壤理化性质的偏相关分析

由于土壤理化性质之间存在较强的两两相关, 因此用偏相关分析来探讨K_s同土壤理化性质的关系。结果显示, RC与K_s呈极显著($p<0.01$)正相关(表2), 且相关系数的绝对值最大, 为0.484。除RC外, SOC也与K_s呈极显著正相关, 但相关系数比RC小, 为0.267。土壤孔性对K_s有很大的影响, CP与K_s呈极显著负相关, NCP与K_s的相关关系虽然没有达到显著性水平, 但在0.1水平上显著正相关($p=0.086$)。BD也是影响K_s的重要因素, 与K_s显著负相关, 相关系数为-0.220(表2)。

表2 土壤饱和导水率与土壤理化性质的偏相关分析

Table 2 Partial correlation analysis of saturated hydraulic conductivity and soil properties ($n=131$)

		碎石含量 Rock fragment content	容重 Bulk density	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	有机碳含量 Soil organic carbon
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	相关系数 Correction coefficient <i>r</i>	0.484**	-0.220*	-0.259**	0.153	0.267**
	<i>p</i>	<0.001	0.013	0.003	0.086	0.002

3.3 环境因子的CCA排序分析

土壤K_s垂直分布受环境因素的影响较为明显(图3)。在CCA排序图中, 环境因子与第一排序轴相关性大小依次为SP > SG > SA > BR > LU; 环境因子与第二排序轴相关性大小依次为LU > SG > BR > SP > SA。因此, 第一排序轴主要是地形地貌信息, 而第二排序轴则主要反应植被和裸岩信息。环境因素对土壤K_s垂直分布的影响从大到小依次为SP > SG > SA > LU > BR。排序图将土壤剖面样点分为四类。第一类主要位于洼地, 土地利用类型主要为农作物和灌草丛, 位于排序轴的第一象限; 第二类样点主要位于上坡位, 裸岩率相对较高, 坡度较大, 位于排序轴的第二象限; 第三类样点较少, 仅13和18两个样点, 分布在排序轴的第三象限; 第四类主要位于下坡位和洼地, 以灌木林和灌草丛为

主, 坡度小, 裸岩率低, 分布在排序轴的第四象限(图3)。

4 讨论

4.1 土壤理化性质对土壤K_s垂直分布的影响

表层(0~10 cm)土壤K_s均值较大(8.72 m d⁻¹), 且远大于该地区2006—2011年最大降雨强度(1.61 m d⁻¹)^[32], 由此可知, 降雨极易入渗, 从而导致地表径流较少。这与已有研究结果相同^[18, 33]。除表层外, K_s的变异系数均在1以上, 属于强变异程度。姚淑霞等^[5]的研究表明, 不同沙地的土壤K_s均属中等程度变异。刘春利等^[2]对黄土高原水蚀风蚀交错区坡面K_s的研究中也指出各层变异相似且为中等程度的变异(0.39<CV<0.57)。说明相

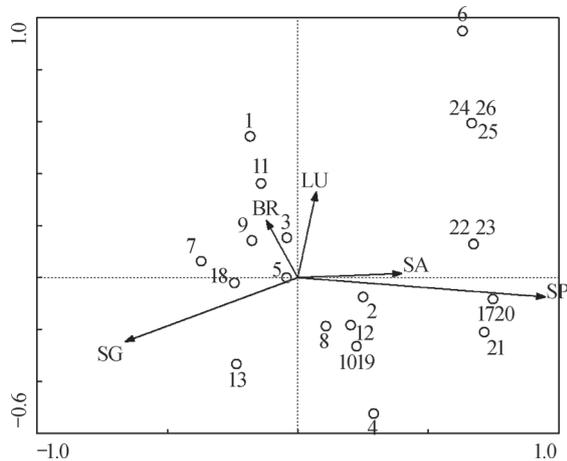


图3 23个样点土壤饱和和导水率的CCA排序
(其中SP为坡位, SG为坡度, SA为坡向, LU为土地利用类型, BR为裸岩率)

Fig. 3 K_s CCA ordination of the 23 sampling profiles
(SP stands for the slope position, SG for the slope gradient, SA for the slope aspect, LU for the land use type and BR for the bare rock)

比其他地区, 喀斯特地区各层 K_s 变异均较大, 这主要受喀斯特地区特殊的环境、高度异质性的地质背景的影响。随土壤深度增加, K_s 变异总体上呈增强趋势(表1)。20~100 cm相差较小, 且变异较为接近, 因此构建水文模型时, 可以用20~30 cm土壤 K_s 代替深层, 从而达到减少工作量而不影响模型精度的效果。

K_s 整体上随土壤深度增加而减小(图2)。这主要受土壤理化性质的影响。土壤 K_s 与BD呈显著负相关, 与NCP在0.1水平上显著正相关(表2)。土壤BD在剖面上随土壤深度的增加而增大, NCP随土壤深度的增加而减小(表1)。彭舜磊等^[6]的研究得出相似的结论, 土层越深, 土壤体积质量越大, 孔隙度降低, K_s 降低。毛管空隙对饱和和导水率有抑制作用(表2), 主要因为毛管水受到毛管力的束缚, 不能自游移动。但CP在整个土壤剖面没有明显的分布规律, 说明CP对 K_s 垂直分布影响不大。

土壤 K_s 与土壤RC存在极显著正相关关系(表2), 这与Chen等^[17]的研究结果相似, 土壤RC有利于土壤的入渗。但是周蓓蓓和邵明安^[9]研究土石混合介质 K_s 时发现随RC的增加, K_s 呈现出先增大后减小的趋势, 并解释为受土壤水分运动通道、过水断面及增加大孔隙的综合作用, 前两者使得 K_s 减小, 后者使得 K_s 增大。在喀斯特地区, 后者的作

用覆盖了前两者, 碎石增加了土壤大孔隙。同时, 喀斯特地区土壤碎石, 尤其是深层土壤碎石风化程度高, 强风化程度有利于土壤入渗^[10], 从而使得喀斯特地区 K_s 与RC呈极显著正相关趋势。然而, 值得注意的是土壤RC总体上随土层深度增加而增大, 与土壤 K_s 的垂直分布规律相反, 这主要是因为 K_s 垂直分布是土壤理化性质与环境因素综合作用的结果, 浅层(0~20 cm)土壤孔隙度高, 容重小, 植物根系高度发育, 土壤生物活动强烈, 使得RC虽然小于深层(20~100 cm), K_s 却远大于深层。深层土壤RC虽然高, 但BD、NCP均较小, 同时植物根系、土壤生物作用远小于浅层。这种综合作用导致 K_s 虽然与RC极显著正相关但二者垂直分布规律相反的现象。

SOC是影响土壤 K_s 的重要因素。梁向锋等^[13]的研究发现随SOC的增加, K_s 呈现出先增加后减小的趋势, 并指出SOC过大时, 孔隙度的增加对导水性能的促进作用小于有机碳的吸附作用。而喀斯特地区未出现 K_s 随土壤有机碳增加而减小的趋势, 这主要因为该地区高有机碳通常伴随着高的RC及较高的根系含量, 这些均促进了土壤入渗, 从而抵消了有机碳的抑制性能。

4.2 环境因素对 K_s 垂直分布的影响

K_s 垂直分布是诸多环境因子共同作用的结果。所涉及的影响因子中, 坡位的影响最大, 而裸岩的影响最小(图3)。这主要是因为裸岩的分布多集中在坡上, 洼地样点几乎没有裸岩。除裸岩外, 土地利用类型的影响也相对较小, 这与已有研究结果不同。姚淑霞等^[5]的研究表明, 不同土地利用类型 K_s 垂直分布状况不同, 并指出草地基本随土壤深度增加而减小, 固定沙地随土壤深度增加而增大, 而流动沙丘随土壤深度变化规律不大。梁向锋等^[13]的研究也发现, 不同植被恢复阶段土壤 K_s 垂直分布状况不同。本研究中, 土地利用类型的影响受到地形因素的制约, 地形的作用覆盖了土地利用的影响, 导致土地利用类型对土壤 K_s 垂直分布影响较小。同种植被在不同地形部位均有分布, 而不同的地形, 土壤性状差异较大。因此, 在喀斯特地区水文模型的构建中, 单考虑土地利用类型对土壤 K_s 的影响远远不够, 必须考虑地形与土地利用类型的综合影响。环境因素中坡度对 K_s 垂直分布特征的影响仅次于坡位。坡度越大, 土壤越容易受侵蚀。有研究表明, 当坡度从9%增加至30%时,

土壤径流量和土壤侵蚀量分别增加了21.1 mm和1.22 kg^[34]。土壤细颗粒随土壤侵蚀被搬运到坡度小的地方, 剩余土壤颗粒较粗, 孔隙较大, 对饱和导水率有较大影响。坡向也是影响饱和导水率的重要环境因子。袁建平等^[35]等对黄土丘陵小流域土壤入渗速率研究时也发现, 阴坡的稳定入渗率要大于阳坡, 并认为主要受植被和枯落物状况的影响。

5 结 论

喀斯特小流域 K_s 随土壤深度的增加而减小, 且二者之间的关系可用对数函数模拟($y = -2.186 \ln(x) + 11.47$, $R^2 = 0.848$)。表层土壤 K_s 显著大于其他各层, 其他各层之间差异不显著。除表层外, 其他各层 K_s 均为强变异程度。20~100 cm各层土壤 K_s 变幅较小, 变异也较为接近, 因此, 在构建水文模型时, 可以用20~30 cm土壤 K_s 来代替深层。喀斯特地区土壤 K_s 受土壤本身理化性质和环境因子的共同影响。其中RC是影响土壤 K_s 最主要的土壤性质, 而SP则是影响 K_s 垂直分布最重要的环境因子。因此, 喀斯特地区植被的恢复重建过程中应重点考虑土壤碎石含量及地形部位的影响。喀斯特小流域土壤 K_s 垂直分布特征及其影响因素的研究可指导该地区水文模型的建立及植被的恢复重建。但由于喀斯特地区土壤变异大, 本研究样点有限, 在结果的精确度上还存在一定的不足。因此在今后的研究中, 应增加取样密度, 增加植被、地形的类型, 从而得到更加可靠的结果。

参 考 文 献

- [1] Sudicky E A, Illman W A, Goltz I K, et al. Heterogeneity in hydraulic conductivity and its role on the macroscale transport of a solute plume: From measurements to a practical application of stochastic flow and transport theory. *Water Resources Research*, 2010, 46 (1) : W01508
- [2] 刘春利, 胡伟, 贾宏福, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性. *生态学报*, 2012, 32 (4) : 1211—1219. Liu C L, Hu W, Jia H F, et al. Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (4) : 1211—1219
- [3] Buttle J M, House D A. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *Journal of Hydrology*, 1997, 203 (1/4) : 127—142
- [4] Moustafa M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt. *Agricultural Water Management*, 2000, 42 (3) : 291—312
- [5] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究. *土壤学报*, 2013, 50 (3) : 469—477. Yao S X, Zhao C C, Zhang T H. A comparison of soil saturated hydraulic conductivity (Kfs) in different Horqin sand land (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3) : 469—477
- [6] 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. *农业工程学报*, 2010, 26 (11) : 7984—7984. Peng S L, You W H, Shen H T. Effect of syndynamic on soil saturated hydraulic conductivity (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2010, 26 (11) : 7984—7984
- [7] Sauer T J, Logsdon S D. Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (6) : 1947—1956
- [8] Novák V, Kňáva K, Šimůnek J. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma*, 2011, 161 (3) : 177—181
- [9] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究. *水土保持学报*, 2006, 20 (6) : 62—66. Zhou B B, Shao M A. Study on saturated hydraulic conductivity of soil stone mixtures (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (6) : 62—66
- [10] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究. *水科学进展*, 2006, 17 (5) : 604—609. Wang H F, Shao M A. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17 (5) : 604—609
- [11] Gwenzi W, Hinz C, Holmes K, et al. Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem. *Geoderma*, 2011, 166 (1) : 43—56
- [12] Zhao P P, Shao M A, Wang T J. Spatial distributions of soil surface-layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors on dam farmlands. *Water Resources Management*, 2010, 24 (10) : 2247—2266
- [13] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响. *生态学报*, 2009, 29 (2) : 636—

642. Liang X F, Zhao S W, Zhang Y, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (2): 636—642
- [14] Lado M, Paz A, BeN-Hur M. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (1): 234—242
- [15] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. *地球科学进展*, 1996, 11 (6): 602—606. Cai Y L. Preliminary research on ecological reconstruction in karst mountain (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 1996, 11 (6): 602—606
- [16] Chen H S, Liu J W, Wang K L, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China. *Catena*, 2011, 84 (1/2): 21—28
- [17] Chen H S, Liu J W, Zhang W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66 (1): 371—379
- [18] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. *农业工程学报*, 2012, 28 (16): 121—126. Chen H S, Yang J, Fu W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2012, 28 (16): 121—126
- [19] Ford D C, Williams P. *Karst hydrogeology and geomorphology*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007
- [20] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review. *International Journal of Speleology*, 2008, 37 (1): 1—10
- [21] Bonacci O. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrological Sciences Journal*, 1993, 38 (1): 51—62
- [22] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能. *中国岩溶*, 2001, 20 (2): 106—110. Jiang Z C, Wang R J, Pei J G, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2001, 20 (2): 106—110
- [23] Zanon F, Borga M, Zoccatelli D, et al. Hydrological analysis of a flash flood across a climatic and geologic gradient: The September 18, 2007 event in Western Slovenia. *Journal of Hydrology*, 2010, 394 (1/2): 182—197
- [24] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A. Unsaturated hydraulic conductivity in limestone dolines: Influence of vegetation and rock fragments. *Geoderma*, 2008, 145 (3/4): 288—294
- [25] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特地区土壤饱和和导水率及其影响因素研究. *灌溉排水学报*, 2008, 27 (5): 74—76, 86. Li X L, Chen X M, Zhou L C, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influential factors in southwest karst region of China (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27 (5): 74—76, 86
- [26] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响. *应用生态学报*, 2007, 18 (7): 1459—1463. Zhang W, Chen H S, Wang K L, et al. Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in Karst depression area (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (7): 1459—1463
- [27] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18 (3): 53—56. Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (3): 53—56
- [28] Lewis C, Albertson J, Xu X L, et al. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope. *Hydrological Processes*, 2011, 26 (10): 1527—1537
- [29] Wang L, Wang Q, Wei S, et al. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (7): 2467—2477
- [30] Li Y, Shao M. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64 (1): 77—96
- [31] 刘光崧. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996. Liu G S. *Soil physical and chemical analysis and description of soil profile (In Chinese)*. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [32] 杨静, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 典型喀斯特峰丛洼地降雨特性及浅层地下水埋深变化特征. *水土保持学报*, 2012, 26 (5): 239—243. Yang J, Chen H S, Nie Y P, et al. Variation of precipitation characteristics and shallow groundwater depth in the typical karst peak-cluster depression areas (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 239—243
- [33] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *Catena*, 2012, 90:

- 53—62
- [34] Ekwue E I, Harrilal A. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystems Engineering*, 2010, 105 (1) : 112—118
- [35] 袁建平, 雷廷武, 郭索彦, 等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性. *水利学报*, 2001, 32 (10) : 88—92. Yuan J P, Lei T W, Guo S Y, et al. Study on spatial variation of infiltration rates for small watershed in loess plateau (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32 (10) : 88—92

VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN A SMALL KARST CATCHMENT

Fu Tonggang^{1, 2, 3} Chen Hongsong^{1, 2*} Wang Kelin^{1, 2}

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

(2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

(3 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Vertical distribution of saturated hydraulic conductivity (K_s) has an important influence on soil hydrological processes. However, relatively speaking, few reports are available on this issue in karst areas with special geologic background. To study vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity (K_s) and its influencing factors in a small karst catchment, soil samples were collected from 23 soil profiles at 0 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 30, 30 ~ 50, 50 ~ 70 and 70 ~ 100 cm soil layers for measurement of K_s , rock fragment content (RC), bulk density (BD), capillary porosity (CP), non-capillary porosity (NCP) and soil organic carbon (SOC). Besides, environmental factors including slop position (SP), slope gradient (SG), slope aspect (SA), bare rock (BR) and land use type (LU) were investigated at each soil profile site, and all the data obtained were analyzed with the partial correlation analysis and canonical correspondence analysis (CCA) methods. Results show that K_s generally decreased with increasing soil depth and the variation could be fitted with a logarithmic function ($R^2=0.848$). The variation of K_s in the soil layers within 20 ~ 100 cm was low in amplitude and approximate to each other, which indicates that K_s in the 20 ~ 30 cm soil layer could be used to represent K_s in the underlying horizons in building hydrological models. Among the soil properties, RC displayed the highest correlation coefficient (0.484) with K_s . In terms of influences of the environmental factors on vertical distribution of K_s , a decreasing order of SP > SG > SA > LU > BR was found. It is, hence quite obvious that RC is the most important soil property and SP the dominant environmental factor that influences vertical distribution of K_s . The findings help understand the laws and major influencing factors of rainfall infiltration and also provide some scientific basis for vegetation restoration in small karst catchments and for building of hydrological models, as well.

Key words Saturated hydraulic conductivity; Partial correlation analysis; Canonical correspondence analysis

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. (475)
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua (488)

Research Articles

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. (498)
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. (506)
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. (515)
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. (526)
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. (536)
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin (546)
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. (556)
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. (565)
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ¹³C pulse labeling technique Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei (574)
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. (585)
 Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin (595)
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. (605)
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. (618)
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. (527)
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. (635)
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. (645)
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. (653)
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu (663)
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. (671)
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. (681)

Research Notes

- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang (689)
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice rootsZheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. (695)
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. (705)
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. (712)

Cover Picture: Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field (by Zhang Zhongbin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

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

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

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

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156