

黄土高原雨养区坡面土壤水力学性质 空间特征及影响因素

白一茹, 王幼奇, 王建宇

(宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021)

摘要:土壤水力学性质在建立水分运动模型及水土保持措施配置中具有重要作用。以网格采样测定了黄土高原雨养区坡面土壤水分特征曲线,拟合了 Van Genuchten 和 Gardner 模型参数,并利用经典统计和地统计方法分析了其空间分布特征及影响因子。结果表明:在黄土高原雨养区复杂的土地利用结构下,坡面表层土壤水力学性质具有明显的空间变异性, Van Genuchten 模型参数 n 不存在空间相关情况,为纯随机变量,参数 $a, A, B, A \cdot B$ 和饱和导水率的空间变异受到系统变异和随机变异的共同作用。Gardner 模型参数 A 和 B 值受到有机质含量的影响,饱和含水量、田间持水量和容重与参数 $A, A \cdot B$ 及有效孔隙度之间的相关性均达到极显著水平。比重与坡面土壤水力学性质之间的相关关系不显著。土地利用和地形因子对水分特征曲线的影响明显,在高吸力阶段,上坡位比下坡位土壤保持的水分多,农田的持水能力不如草地和林地。

关键词:黄土高原雨养区; 水力学参数; 空间变异; 水分特征曲线

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0168-05

Spatial Variability of Soil Hydraulic Properties and Influence Factors on Hillslope in Rainfed Region of the Loess Plateau

BAI Yiru, WANG Youqi, WANG Jianyu

(College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil hydraulic properties are very important in establishing water movement model and soil and water conservation. In this study, soil water characteristic curves of a slope were measured based on the grid sampling in rainfed region of the Loess Plateau. The parameters of Van Genuchten and Gardner model were fitted, and their spatial distribution characteristics were analyzed with classical statistics and geostatistics method. Then we examined the influencing factors on soil hydraulic properties. The results showed that the spatial variability of soil hydraulic properties on the slope surface was significant due to the complicated land use structure in the rainfed region of the Loess Plateau. Parameter n did not have spatial correlation and was thought as the simple random variable. The spatial variability of parameters ($a, A, B, A \cdot B$) and K_s was influenced by systematic and random variations. The organic matter contents had effect on parameters A and B in Gardner model. Parameters A, B and effective porosity showed extremely significant correlations with saturated water content, field capacity and bulk density. The relationships between soil specific gravity and soil hydraulic properties were not significant. Soil water characteristic curves were influenced obviously by land uses and topography. At the high suction stage, the soil in the uphill can hold more moisture than downhill. The water holding capacity of farmland was less than grassland and forestland.

Keywords: rainfed region of the Loess Plateau; hydraulic properties; spatial variability; water characteristic curve

黄土高原雨养区气候变化剧烈,降雨量低,加之人为不合理的开垦和放牧,使大部分天然植被消失殆尽,土壤理化性质逐渐变差,土壤结构受到严重破坏,从而导致水土流失和土壤侵蚀状况异常严重,生态环境极为脆弱^[1]。土壤水分是黄土高原地区植被生长最主要的限制因子,土壤水分亏缺容易形成土壤干层,土壤水分运动直接影响土壤水分的渗流,可使土壤干层水分得到补给^[2]。土壤水力学性质是研究土壤水分运动和溶质运移的理论基础,是影响流域水文模型的重要因素,可为改善坡面土壤结构和水土流失状况提供帮助。研究土壤水力学性质的空间变异性对于揭示黄土高原土壤侵蚀过程、土地管理和可持续利用以及水土保持措施的配置等有着重要意义。

国内外许多学者对土壤水力学性质的空间变异进行了大量的试验研究,得出了许多可供参考的结论。Olyphant^[3]研究得出砂土的 Van Genuchten 模型参数随时间基本呈现稳态的变化趋势,但在监测期结束前有异常值出现。陈洪松^[4]研究得出黄土高原沟壑区小流域坡面土壤水分特征曲线具有一定的空间变异性,且饱和导水率的空间分布与有机质含量、黏粒含量和根系分布有关。郑纪勇^[5]等分析得出黄土高原水蚀风蚀交错带水力学性质沿土壤剖面的变异不显著。El Idrysy 和 De Smedt^[6]利用水力坡度进行协同克里格空间插值可以较好的预测导水率的空间变异。已有研究表明不同空间位置的水力学参数呈现出不同的变化规律^[7-8],但是随研究区域的尺度、环境、地形及土壤类型的变化,土壤空间变异性具有特定性和多变性,黄土高原雨养区生态环境脆弱、土地利用方式和地形复杂,已有的空间变异特征无法准确地描述该区域土壤水力学性质的空间变化规律。本文运用经典统计和地统计方法分析黄土高原雨养区坡面土壤水力学性质的空间变异性,及其在坡面上的分布特征和环境因子的影响作用,为建立坡面土壤水分运动模型和土壤水分的合理配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中科院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,该试验站位于陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟流域,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区,属中温带半干旱草原季风气候,年平均降水量 437 mm,年内年际变化大,7—8 月份降水量最多,

约占全年降水量的 50% 以上。主要的土壤类型为绵沙土,硬黄土,红土以及在沙地发育起来的风沙土。

1.2 采样点分布及样品分析

本文选取六道沟流域的一个坡面,山体走向为东西方向,坡长 350 m,坡顶海拔 1 256 m,整个坡面除了距坡顶 110 m 左右较陡外,其它坡度为 20° 左右。坡顶为长芒草地,坡面上端 110 m 内为已退耕 20 a 的老苜蓿地,坡中是退耕 4 a 的杏树林,伴有草木樨—黄芪—乌里胡枝子建群种,坡下大部分为农田和少部分已退耕 4 a 的杏树林。在坡面上按照 10 m × 20 m 进行网格采样,取表层原状土和扰动土,采样点数为 54。土壤水分特征曲线用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机测定,然后利用美国盐土实验室 RETC 软件拟合水力学参数;有机质用重铬酸钾容量法测定;容重、饱和含水量和田间持水量用环刀法测定;比重用比重瓶法测定。

1.3 统计分析方法

1.3.1 经典统计方法 随机变量的离散程度,即空间变异性的 大小,可用变异系数 CV 的大小来反映,具体计算公式为:

$$CV = \frac{s}{m} \quad (1)$$

式中: m ——样本平均值; s ——标准差。

根据变异程度分级: $CV < 10\%$ 为弱变异性; $10\% \leq CV < 100\%$ 为中等变异性; $CV \geq 100\%$ 为强变异性。

1.3.2 地统计方法 地统计学是以区域化变量和随机函数为基础,以半方差函数和 Kriging 插值为基本工具的一种统计方法^[6]。半方差函数可用下式表示:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (2)$$

式中: $r(h)$ ——半方差函数; h ——滞后距离,即分隔两样点的矢量; $N(h)$ ——滞后距离为 h 时的样本对数; $Z(x)$, $Z(x+h)$ ——区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x 和 $x+h$ 的实测量。

1.4 水分特征曲线模型

Van Genuchten 模型适用范围较广,对不同质地的土壤水分特征曲线均能很好的拟合,因而成为研究水分特征曲线的通用模型^[9]。公式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (a h)^n} \right]^m \quad (3)$$

式中: θ_r ——滞留含水量; θ_s ——饱和含水量,参数 n 为曲线形状因子或孔隙大小指标,参数 a 为进气吸力的倒数,有效孔隙度为饱和含水量和滞留含水量之差。

Gardner 的幂函数模型 $\theta = AS^{-B}$ 对黄土高原几

种典型土壤的持水曲线都适用^[10],而且具有待定参数较少的优点,在实际应用中更为方便。 A 值决定曲线高低,表示持水能力大小, B 值决定曲线走向,表示土壤含水量随吸力降低而递减的快慢。 $A \cdot B$ 与土壤的供水性和耐旱性密切相关,也是土壤水力学性质中极重要的参数。

利用 SPSS 17.0 进行经典统计和相关性分析,GS+7.0 进行地统计分析,克里格插值图用 Surfer 8.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤水力学性质的统计特征分析

表 1 为坡面表层土壤水力学性质的统计特征结果,可以看出参数 n 和 B 的变异系数小于 10%,在坡面上表现为弱变异性,参数 $a, A, A \cdot B$ 、有效孔隙度

和饱和导水率的变异系数均大于 10%,在坡面上表现为中等变异性。其中饱和导水率的变异系数最大,这与郑纪勇等的研究结果类似^[11]。黄土高原坡面水力学性质表现出较强的变异性,这主要是因为研究坡面上种植了多种植被,从坡顶到坡底依次主要生长着长芒草—杏树—苜蓿—杏树—谷子,并伴有草木樨—黄芪—乌里胡枝子建群种,这种复杂的土地利用结构模式会对土壤水分分布、入渗和径流产生影响,导致坡面土壤侵蚀程度不均^{—[12]},从而影响土壤水力学性质的空间分布。偏度系数和峰度系数分别描述总体概率分布的偏斜程度及陡缓程度。当偏度系数接近于 0,峰度系数接近于 3 时,说明频率分布曲线的对称性较好且陡缓适中。由表 1 可以看出除了参数 A 和 $A \cdot B$ 以外,其它参数均为正偏,其中参数 a 的对称性最差且曲线最陡。

表 1 坡面土壤导水特性的描述性统计特征值

导水特性	平均值	标准差	标准误	变异系数/%	偏度系数	峰度系数	KS 检验
a	0.0349	0.0155	0.0021	44.45	1.7915	4.7727	$p=0.00001$
n	1.6668	0.0738	0.0100	4.43	0.5813	-0.2117	$p=0.047$
A	0.1062	0.0152	0.0021	14.31	-0.0866	-0.2895	$p>0.15$
B	0.1909	0.0166	0.0023	8.71	0.1036	-0.5441	$p>0.15$
$A \cdot B$	0.0202	0.0029	0.0004	14.49	-0.2425	0.0177	$p>0.15$
有效孔隙度/($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.2725	0.0409	0.0056	15.01	0.6267	0.3895	$p>0.15$
$K_s \times 10^{-4}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	17.2081	10.4594	1.4233	60.78	1.0953	0.8468	$p=0.0049$

2.2 坡面土壤水力学性质的半方差分析

由表 2 可以看出,参数 n 的块金值与基台值相等,半方差函数随滞后距离的增加保持不变,表现为纯块金效应,不服从本征假设,说明参数 n 不存在空间相关,为纯随机变量,其空间上的变异是由取样测定误差及取样点内部本身的变异引起的。参数 $a, A, B, A \cdot B$ 、有效孔隙度和饱和导水率的空间半方差函数符合指数模型,而且块金效应明显。参数 $a, B, A \cdot B$ 和饱和导水率的变程都超出了研究区域的范围,说明它们的空间变化较和缓,对它们空间变异的研究需要在更大尺度上进行分析。

块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 是空间异质比,反映随机部分的空间变异性占总空间变异性的程度,当 $C_0/(C_0+C) \leq 25\%$ 时表示强的空间依赖性, $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$ 表示中等的空间依赖性, $C_0/(C_0+C) \geq 75\%$ 表示较弱的空间依赖性。由表 2 可以得出,参数 $a, A, B, A \cdot B$ 和饱和导水率表现为中等的空间依赖性,表明它们的空间变异受到系统变异和随机变异的共同作用,施肥、耕作、灌溉、土地利用方式、试验误差等随机性因素使坡面水力学性质的

空间自相关程度减弱,趋向均一化的方向。有效孔隙度的空间异质比小于 25%,表现为强的空间依赖性,说明结构性因素(气候、地形、母质等)是引起有效孔隙度空间分布异质性的主要因素,因而较小尺度上的变异过程可以忽视。

分维数值 D 表征样本之间的结构性。 D 值介于 1~2 之间,越接近于 1,说明样本的结构性较好,均一程度较差,越接近于 2,说明样本的随机性越强,均一程度越好。各个参数的分维值从大到小依次为:饱和导水率(1.986), a (1.985), n (1.971), B (1.968), $A \cdot B$ (1.956), A (1.913),有效孔隙度(1.840)。饱和导水率的分维值最大,其采样点之间的差异性较小,采样间距可以较大,而参数 A 和有效孔隙度的采样间距则应该小一些。

2.3 土壤理化性质与水力学性质的相关性分析

由于土壤特性之间存在着互相影响、互相制约的关系,本文对黄土高原坡面土壤理化性质和水力学性质进行了 Pearson 相关分析。通过表 3 可以看出坡面土壤理化性质和水力学性质之间存在着一定的相关性。Gardner 模型参数 A, B 值都受到有机质含量

的影响,说明有机质可以有效改善土壤结构,使土壤孔隙度提高,持水供水能力增强。饱和含水量、田间持水量和容重与参数 A 、 $A \cdot B$ 及有效孔隙度之间的相关性均达到极显著水平,其中土壤容重与参数 A 和 $A \cdot B$ 都呈负相关性,吕殿青等也研究发现 Brooks-Corey 模型参数 a 和 λ 都随土壤容重的增加

而减小^[13]。土壤理化性质对 Van Genuchten 模型参数和饱和导水率的影响不明显,原因可能是坡面复杂的土地利用结构模式并存在较强的人为干扰。比重与坡面土壤水力学性质之间的相关关系不显著,这是因为坡面土壤比重变化很小,其变异系数仅为 2.09%,因而对水力学性质的影响作用被减弱。

表 2 坡面土壤水力学性质的半方差模型参数

导水特性	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程/m	$C_0/(C_0+C)/\%$	r^2	RRS	分维数
a	指数模型	0.00022	0.00044	410.9	50	0.115	7.214 E-09	1.985
n	指数模型	0.0054	0.0054	240.28	100	0.175	4.406 E-06	1.971
A	指数模型	0.000167	0.000335	138.3	49.85	0.818	1.658 E-09	1.913
B	指数模型	0.000239	0.000480	610.9	49.79	0.543	5.869 E-09	1.968
$A \cdot B$	指数模型	7.5 E-06	1.51 E-05	410.9	49.67	0.509	3.00 E-12	1.956
有效孔隙度	指数模型	0.000886	0.00395	316.3	22.43	0.846	1.636 E-07	1.840
饱和导水率 K_s	指数模型	98.7	197.5	410.9	49.97	0.229	726	1.986

表 3 土壤理化性质与水力学性质的 Pearson 相关系数

土壤理化性质	a	n	A	B	$A \cdot B$	有效孔隙度	饱和导水率
有机质	-0.042	0.122	-0.291*	0.274*	-0.121	0.042	-0.181
比重	0.000	0.074	-0.135	-0.036	-0.149	-0.067	0.034
饱和含水量	0.066	0.036	0.466**	0.237	0.611**	0.684**	0.150
田间持水量	-0.059	-0.009	0.464**	0.234	0.597**	-0.483**	-0.044
容重	-0.096	-0.065	-0.384**	-0.261	-0.547**	0.679**	-0.163

注: * 表示显著水平为 0.05; ** 表示显著水平为 0.01。

2.4 土地利用和地形对坡面土壤水分特征曲线影响

土地利用和地形因子是研究坡面土壤水分变异的重要影响因素^[14],并与土壤特性的空间分布有一定相关性^[15]。从图 1 可以看出,在高吸力阶段,上坡位置的土壤比下坡位置的土壤能够保持较多的水分,说明上坡的土壤结构较下坡好,这可能是水土流失的冲刷作用使下坡土壤颗粒较粗,比重

增加,而且下坡位置人为踩踏和放牧的影响较大,这些因素的综合作用导致下坡土壤的持水能力较差。从土地利用方式来看,土壤持水能力依次为:苜蓿地>杏树林>长芒草地>谷子地,说明土地利用方式对土壤水分特征曲线影响较大,常年耕作破坏了土壤的结构,使土壤质量下降,导致农田的持水能力不如草地和林地。

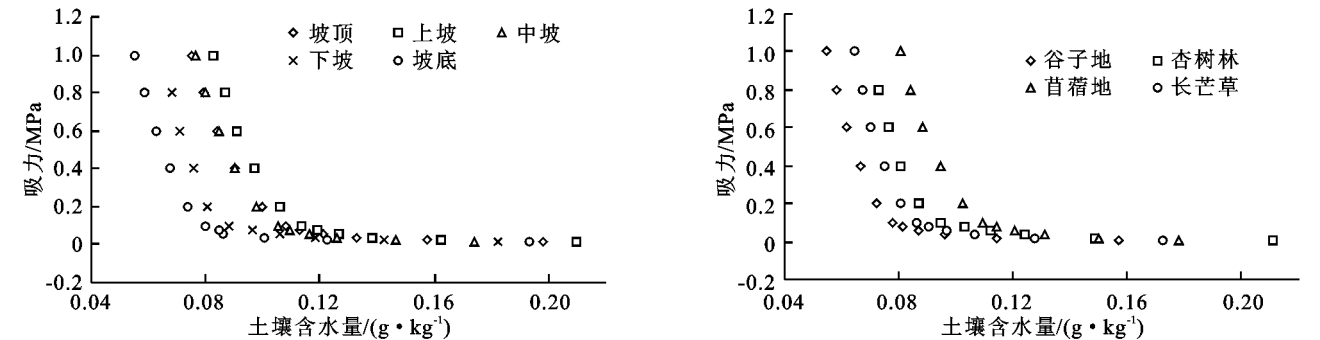


图 1 土地利用和地形因子对土壤水分特征曲线的影响

2.5 坡面土壤水力学性质的 Kriging 插值

从图 2 可以看出各个参数的空间分布有较明显的区别,这主要是受到土壤水分状况、土壤质地、结构、植被的分布和种类、坡位和坡向等因素共同作用的影响。

参数 A 在坡底较小,在中坡较大,参数 B 在中坡到坡顶较小,而在坡底位置较大,空间分布差异性不

大。有效孔隙度的空间分布受到饱和含水量和滞留含水量的共同影响,可以看出中坡和上坡的有效孔隙度较高,而下坡和坡底位置较小。饱和导水率在坡面上的空间分布差异最明显,呈斑点状分布,中坡位置较大。有效孔隙度和饱和导水率的空间分布特征与 Hendrayanto 研究森林坡地土壤水力学性质空间变异性的结果类似^[7]。

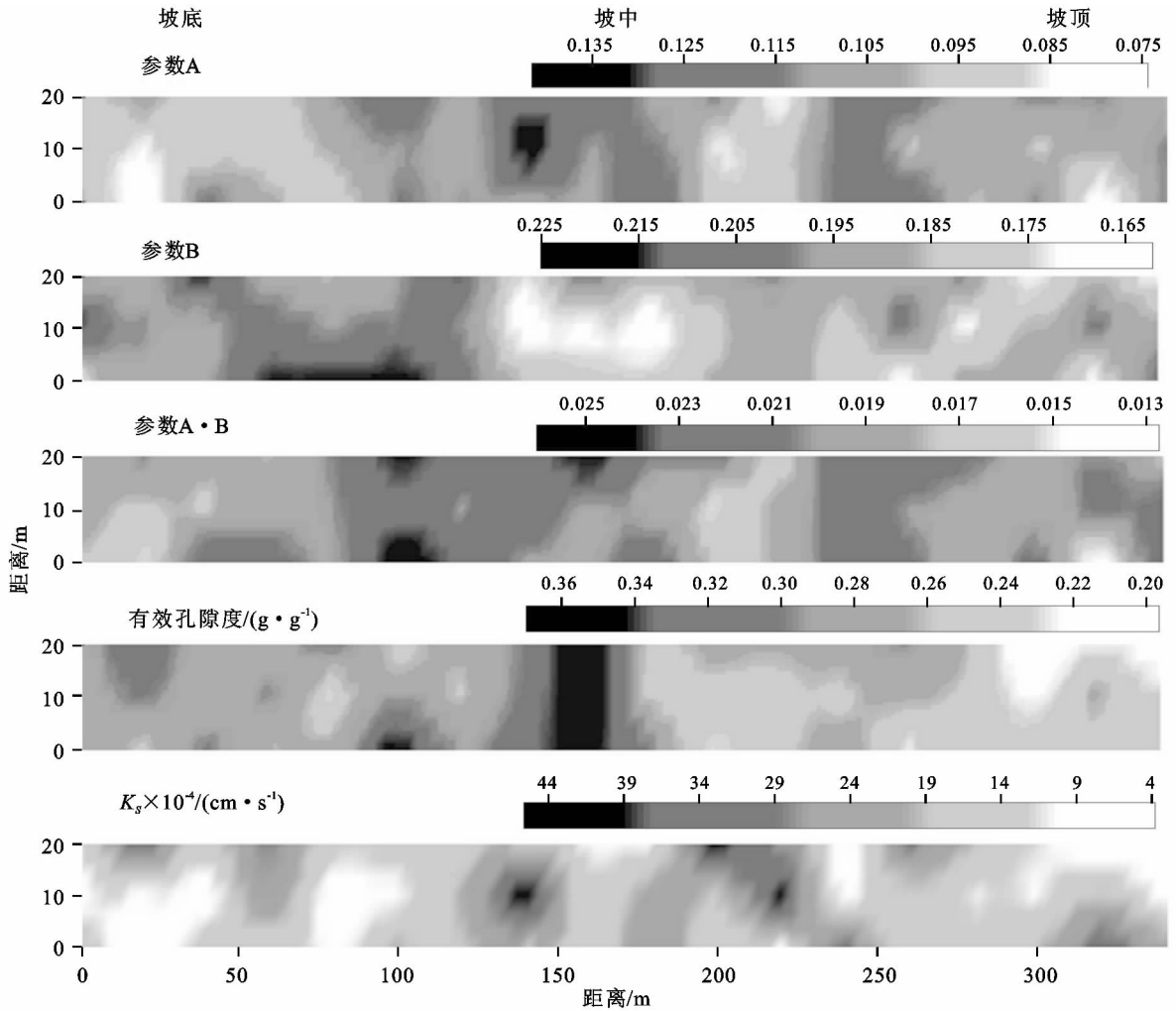


图 2 坡面土壤水力学性质的 Kriging 插值

3 结论

(1) 在黄土高原雨养区复杂的土地利用结构下,坡面表层土壤水力学性质具有明显的空间变异性。Van Genuchten 模型中的参数 n 不存在空间相关情况,为纯随机变量。参数 $a, A, B, A \cdot B$ 和饱和导水率的空间变异受到系统变异和随机变异的共同作用,反映出施肥、耕作、灌溉、土地利用方式等随机性因素导致坡面水力学性质的空间自相关程度减弱。

(2) 坡面土壤理化性质和水力学性质之间存在着一定的相关性。Gardner 模型参数 A, B 值都受到有机质含量的影响。饱和含水量、田间持水量和容重与参数 $A, A \cdot B$ 及有效孔隙度之间的相关性均达到极显著水平。比重与坡面土壤水力学性质之间的相关关系不显著。

(3) 土地利用和地形因子对水分特征曲线的影响很明显。在高吸力阶段,上坡位置土壤比下坡位置土壤保持的水分多。农田的持水能力不如草地和林地。

参考文献:

[1] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与可持续发展[M].

北京:科学出版社,1998.

[2] 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报,2004,41(1):1-6.

[3] Olyphant G A. Temporal and spatial (down profile) variability of unsaturated soil hydraulic properties determined from a combination of repeated field experiments and inverse modeling [J]. Journal of Hydrology, 2003, 281(1):23-35.

[4] 陈洪松.坡面尺度土壤特性的空间变异性[J].水土保持通报,2004,24(6):45-48.

[5] 郑纪勇,邵明安,李世清,等.水蚀风蚀交错带土壤剖面水力学性质变异[J].农业工程学报,2005,21(11):64-66.

[6] El Idrys E H, De Smedt F. A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics [J]. Hydrogeology Journal, 2007,15(3):459-470.

[7] Kosugi K, Uchida T, Matsuda S, et al. Spatial variability of soil hydraulic properties in a forested hillslope [J]. Journal of Forest Research, 1999,4(2):107-114.

[8] 李娇,牛健植.北京西山侧柏林和刺槐林土壤水分研究[J].水土保持研究,2013,20(1):98-101.

传统排水机制成本高、占地面积大,只是雨水排出的系统,而雨水作为未来城市发展的重要水源,如果仍然按照传统方式规划,则解决不了由于城市快速发展所引发的一系列环境问题。绿色生态排水系统与传统理念上的排水系统不同,它依托于城市绿地网络体系,对城市绿地进行改造,达到利用绿地对雨水进行蓄、渗、排的多重效果,构建绿色生态排水系统,将排水与景观合并是势在必行的选择。结合郑州市绿地建设城市蓄水调水系统,在城市绿地设计多目标中实现雨水资源利用多目标,提出从屋顶到道路、广场,再到绿地的雨水资源综合利用路线,将这些隐形蓄水设施相互连通,并使其与城市地下排水系统相连,运用于郑州市生态排水网络系统的构建,达到改善郑州水环境和减轻城市内涝灾害的目的,实现新型的可持续雨洪利用模式,使郑州市变成宜居的、可持续的、吸引人的城市。

参考文献:

- [1] 吕树全. 雨水资源利用为城市水资源的可行性分析[J]. 硅谷, 2013(22):149-150.
- [2] 贾绍凤, 何希吾, 夏军. 中国水资源安全问题及对策[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(5):347-351.
- [3] 车伍, 周晓兵. 城市风景园林设计中的新型雨洪控制利用[J]. 中国园林, 2009, 24(11):52-56.
- [4] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2):230-234.
- [5] Tackett T. Seattle's Policy and Pilots to Support Green Stormwater Infrastructure[C]// Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection. ASCE, 2009:1-4.
- [6] 车伍, 张伟, 李俊奇, 等. 中国城市雨洪控制利用模式研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16):51-57.
- [7] 车伍, 马震, 王思思, 等. 中国城市规划体系中的雨洪控制利用专项规划[J]. 中国给水排水, 2013, 29(2):8-12.
- [8] 张伟, 车伍, 王建龙, 等. 利用绿色基础设施控制城市雨水径流[J]. 中国给水排水, 2011, 27(4):22-27.
- [9] 闫攀, 车伍, 赵杨, 等. 绿色雨水基础设施构建城市良性水文循环[J]. 风景园林, 2013(2):32-37.
- [10] 田仲, 苏德荣, 管德义. 城市公园绿地雨水径流利用研究[J]. 中国园林, 2009, 24(11):61-65.
- [11] 陈朋成, 周孝德, 程文. 西北城市雨水资源化利用[J]. 西北水力发电, 2007, 23(2):31-34.
- [12] 冯峰, 谷晓伟, 何宏谋. 郑州市雨水资源利用潜力及效益量化研究[J]. 水资源保护, 2013, 29(4):68-71.
- [13] 田国行, 赵亚敏. 郑州市郑东新区东三环景观规划设计[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5):171-175.
- [14] 路毅, 董艳桐. 城市绿地雨水利用的基本途径[J]. 北方园艺, 2008(9):145-147.
- [15] 潘文东, 潘学渊, 刘琳琳. 北方城市利用绿地滞蓄汛雨的分析与研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2):127-128, 132.
- [16] 高桥浩一郎. 月平均气温、月降水量和月蒸发量关系的推定[J]. 天气, 1979, 6(12):29-32.
- [17] 叶守泽. 水文及水利计算[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
- [18] 林冰. 大连市降雨特性与雨水资源化的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [19] 王淑芬, 杨乐, 白伟岚. 技术与艺术的完美统一:雨水花园建造探析[J]. 中国园林, 2009, 25(6):54-57.
- [20] Low State University. Iowa Stormwater Management Manual[M]. Iowa State: Iowa State University of Science and Technology, 2007.
- [21] 罗红梅, 车伍, 李俊奇, 等. 雨水花园在雨洪控制与利用中的应用[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6):48-52.

(上接第 172 页)

- [9] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44:892-898.
- [10] 刘恩斌, 董水丽. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7):20-26.
- [11] 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[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3):53-56.
- [12] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(1):84-91.
- [13] 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3):209-216.
- [14] 李阳芳, 宋维峰, 和俊, 等. 元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6):54-57.
- [15] Wei Jian-Bing, Xiao Du-Ning, Zeng Hui, et al. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China [J]. Environmental Geology, 2008, 53(8):1663-1672.