

# 基于 GIS 和地统计学的甘肃省白龙江 流域土壤氮素空间变异分析

齐姗姗, 巩杰, 张影, 钱彩云

(兰州大学 资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 分析甘肃省白龙江流域土壤氮素(全氮、硝态氮和铵态氮)空间变异规律, 为土壤氮素管理与流域综合生态系统调控提供科学依据。[方法] 采集 0—20 cm 土壤氮素样点, 室内试验得到样本土壤氮素含量, 利用 ArcGIS 10.2 和地统计学方法等探讨研究区内土壤氮素的空间异质性和分布格局。[结果] 土壤全氮、硝态氮和铵态氮都属于中等强度变异, 变异系数范围在 35%~90%之间; 土壤氮素半方差模型的块基比在 25%~75%之间, 具中等强度的空间相关性, 空间变异受到结构性因素和随机性因素共同影响; 土壤全氮、硝态氮和铵态氮的最佳拟合模型均为高斯模型。总体上, 土壤全氮和硝态氮含量主要由西北向东南逐渐降低; 铵态氮含量整体分布表现为西北低, 东南高的趋势。[结论] 土壤全氮和硝态氮在不同土地利用类型和海拔高度间呈极显著或显著差异; 土壤铵态氮在不同土地利用类型和海拔高度间差异不明显。

**关键词:** GIS; 地统计学; 土壤氮素; 空间变异; 甘肃省白龙江流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)05-0146-05

**中图分类号:** S158.2

**文献参数:** 齐姗姗, 巩杰, 张影, 等. 基于 GIS 和地统计学的甘肃省白龙江流域土壤氮素空间变异分析 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 146-150. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.002

## Spatial Variability of Soil Nitrogen in Bailongjiang Watershed in Gansu Province Based on Geostatistics and GIS

QI Shanshan, GONG Jie, ZHANG Ying, QIAN Caiyun

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education,

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to analyze the spatial variability of soil nitrogen (total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen) in Bailongjiang watershed in Gansu Province, and provide scientific basis for the management of soil nitrogen and the regulation of integrated ecosystem. [Methods] Soil samples were collected at a depth of 0—20 cm, and were tested in laboratory. Geostatistical methods combined with ArcGIS 10.2 were applied to analyze the spatial variability and distribution pattern of soil nitrogen. [Results] The variation coefficient of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were moderate, with the value ranged from 35% to 90%. The ratios of nugget to sill of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were ranged from 50.13% to 63.19%, the spatial variability was affected by structural and random factors, and the best fitting theoretical semivariogram models of soil nitrogen were Gaussian models. As a whole, the spatial distribution of total nitrogen and nitrate nitrogen were higher in northwest but lower in southeast, and the soil ammonium nitrogen in the northwest area was lower than that in southeast. [Conclusion] The content of total nitrogen and nitrate nitrogen varied remarkably in different land use types and altitudes, while there was no significant correlation between ammonium nitrogen and

收稿日期: 2016-03-12

修回日期: 2016-03-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究”(41271199); 甘肃省民生科技计划项目(1503FCME006)

第一作者: 齐姗姗(1991—), 女(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为景观生态学、土地变化科学。E-mail: qishsh14@lzu.edu.cn。

通讯作者: 巩杰(1975—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 博士, 硕士生导师, 主要从事景观生态学、土地变化科学、环境遥感与生态评价、生态系统服务等方面的研究。E-mail: jgong@lzu.edu.cn。

different land use types and altitudes.

**Keywords:** GIS; geostatistics; soil nitrogen; spatial variability; Bailongjiang watershed in Gansu Province

土壤氮素是植物生长发育所必需的主要营养元素,其迁移和含量(尤其是硝态氮、铵态氮等速效氮形式)深刻地影响着区域水环境和各种生态过程<sup>[1]</sup>,是土壤学、生态学和环境变化研究的核心内容之一。受地形、气候、土地利用等多种因素的综合影响,区域土壤氮素的空间分布存在明显的空间异质性,尤其是在地形复杂的脆弱过渡带上,而这种空间分布的差异,不仅影响着区域土壤氮资源利用与管理,而且是区域氮素迁移的环境风险评价的重要因素之一。因此,如何准确分析并展示土壤氮素的空间变化规律及其分布特征具有重要意义。地统计学已经成为评估非采样或采样稀疏点区域土壤性能的重要研究方法,同时为空间模式的描述、空间预测以及土壤属性不确定性评价提供大量的统计学工具<sup>[2]</sup>。如余冬立等<sup>[3]</sup>利用地统计学方法分析了黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间分布特征及其变异性。Ruffo等<sup>[4]</sup>利用数据分析和地统计学方法研究美国 Illinois 农田短期实施氮肥对土壤氮素空间变异性的影响。然而这些研究多是集中于长期耕作的农业土地和平原地区<sup>[5-6]</sup>,而面对灾害频繁、地形复杂、采样困难的脆弱土石山地过渡带的研究极少。

甘肃省白龙江流域地处青藏高原与黄土高原的交错过渡带上,流域内地貌复杂、水土流失严重、人类活动频繁,深刻地影响着区域土壤氮素的保存与利用,进而影响到区域生态系统的稳定性和可持续性<sup>[7]</sup>。因此,本文拟以GIS技术和地统计学方法,对研究区的0—20 cm土壤氮素进行地统计分析,探究其空间分布特征,以期为同地形的其他区域土壤氮素资源的管理和生态环境建设提供一定的理论与实践价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

甘肃省白龙江流域(32°36′—34°24′N,103°30′—106°0′E)位于甘肃省东南部山区,青藏高原东北边缘,属于西秦岭侵蚀—剥削构造山地。行政单元主要包括迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区 and 文县。流域地势西高东低,海拔高度在600~4 828 m之间。区域气候类型复杂多样,属于暖温带湿润气候和北亚热带湿润气候交错带,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,年均气温6~14.9℃,年降水量约400~850 mm。流域内植被覆盖度较高,且表现出一定的垂直和水平分布规律,植被类型主要是亚高山针叶林、高山灌木林、落叶阔叶林、落叶阔叶和常绿阔叶混交林等;土壤类型

以棕壤、暗棕壤、淋溶褐土、高山草甸土、褐土为主,呈现出一定的垂直分布规律。气候适宜多种农作物生长,尤以红芪、纹党、大黄、当归、半夏等中药材最为著名,花椒、橘柑、油橄榄等经济果林达百余种。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤采样与测定 甘肃省白龙江流域土样采集工作时间为2014年7—8月,在流域内共采取代表性样点143个表层土壤(每个样点采样层次分别为0—5,5—10和10—20 cm)。将所采土壤样品自然风干,挑除土壤中的植物根茎及残体、石块、新生体和侵入体等杂物后,研磨过100目筛后装袋待测。土壤全氮测定采用半微量凯氏定氮法,土壤硝态氮和铵态氮测定采用浸提—靛酚蓝比色法,计算0—20 cm土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量。

1.2.2 地统计学方法 由于土壤氮素含量常规统计分析只能在一定程度上反映某一性质的总体属性,局部的变化特征较难显示,更不能定量地刻画土壤特性的随机性、结构性、独立性和相关性。因此,有必要进一步利用半方差函数分析土壤空间变异性<sup>[8]</sup>。半方差函数表示为:

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

式中: $\gamma(h)$ ——间隔距离 $h$ 的半方差; $h$ ——土壤样本间距,称为步长; $N(h)$ ——间距为 $h$ 的所有观测样点的成对数; $Z(x_i), Z(x_i + h)$ ——在 $x_i$ 和 $x_i + h$ 位置时的实测值。半方差函数值 $\gamma(h)$ 随着样点间距的增加而增大,并在一定的间距 $h$ 升大到一个基本稳定的常数(基台值)。本文所运用的模型主要是球状、高斯和指数模型。

1.2.3 数据处理 由于土样是分层采样,故需对分层测量结果进行计算以得到0—20 cm的土壤氮素含量,计算公式为:

$$A = a \times \frac{5}{20} + b \times \frac{5}{20} + c \times \frac{10}{20} \quad (2)$$

式中: $A$ ——0—20 cm土壤氮素含量(g/kg); $a$ ——0—5 cm土壤氮素含量(g/kg); $b$ ——5—10 cm土壤氮素含量(g/kg); $c$ ——10—20 cm土壤氮素含量(g/kg)。

特异值采用域法识别处理,即样本平均值加减3倍标准差,在此区间以外的数据均定为特异值,然后分别用正常最大值和最小值代替特异值<sup>[9]</sup>。利用SPSS软件的QQ正态分布图判断数据是否符合正态分布。即在QQ正态分布图中,各点近似围绕着直线或近于一条直线,说明数据呈近似正态分布<sup>[10]</sup>。

分析可知:全氮和硝态氮数据进行对数转换后符合正态分布;铵态氮含量呈现正态分布,数据适合进行地统计分析,否则可能存在比例效应,使方差函数产生畸变<sup>[11]</sup>。地统计分析、半方差函数的拟合、图形的编辑以及输出等采用 ArcGIS 10.2 中的 Geostatistical Analyst 模块。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤氮素含量的统计分析

从表 1 可知,研究区土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量分别在 0.38~5.92,0.08~6.06 和 0.36~3.45 g/kg 之间。变异系数( $C_v$ )的大小表示土壤特性空间变异性的程度。通常认为  $C_v \leq 10\%$  时为弱变异性,  $10\% < C_v < 100\%$  时为中度变异性,  $C_v \geq 100\%$  时为强变异性<sup>[12]</sup>。土壤氮素变异系数在 35%~90% 之间,均属于中度变异,其中铵态氮的变异系数最大(90%),说明在 0—20 cm 土层中,土壤铵态氮的变异最为剧烈。

### 2.2 土壤氮素空间变异分析

通过 Cross-Validation 运用球状、高斯和指数模

型对研究区数据进行参数的交叉验证。判断半方差函数模型及其参数是否合适的综合标准是平均预测误差(M)、预测误差的均方根(RMS)和平均标准差(MS)越小越好,标准均方根预测误差(RMSS)越接近 1 越好的原则<sup>[13]</sup>。相应的半方差理论模型及各项参数见表 2。分析可知,研究区土壤氮素的空间变异性均符合高斯模型。

块金值表示由试验误差和小于试验取样尺度引起的变异,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程(采样误差、随机和固有变异等)影响较大。基台值反映土壤变量的空间相关性,基台值越高,表明总的异质性越高<sup>[14]</sup>。块金效应是块金值与基台值之比,表明空间相关性程度。若块金效应  $< 25\%$  说明土壤变量具有强烈的空间相关性;比例在 25%~75% 之间表明变量具有中等的空间相关性;比例  $> 75\%$  说明变量空间相关性很弱<sup>[15]</sup>。

表 3 表明土壤氮素具有中等的空间相关性,表明研究区土壤氮素的空间变化特征是随机性因素和结构性因素共同影响的结果。

表 1 研究区土壤氮素统计特征值

项目	最大值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	最小值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	平均值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	标准差/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	偏度系数/ %	峰度系数/ %	变异系数	分布类型
全氮	5.92	0.38	2.11	1.21	1.12	1.28	0.57	LN
硝态氮	6.07	0.08	1.54	1.39	1.35	1.07	0.90	LN
铵态氮	3.46	0.36	1.64	0.58	0.47	0.45	0.35	N

注:LN 为对数正态分布;N 为正态分布。

表 2 土壤氮素含量半方差模型交叉验证结果

项目	Kriging 模型	平均预测误差	均方根预测误差	平均标准差	标准均方根预测误差
全氮	球状模型	0.112 2	1.222 0	-0.051 5	0.988 2
	指数模型	0.116 0	1.236 6	-0.042 3	0.982 3
	高斯模型	0.066 0	1.148 4	-0.057 2	0.999 1
硝态氮	球状模型	0.101 3	1.502 9	-0.057 8	0.911 4
	指数模型	0.128 9	1.524 2	-0.041 1	0.860 3
	高斯模型	0.086 1	1.477 1	-0.058 8	0.929 9
铵态氮	球状模型	-0.006 8	0.498 3	-0.037 3	1.036 5
	指数模型	-0.006 3	0.507 4	-0.044 2	1.057 4
	高斯模型	-0.008 8	0.498 3	-0.040 1	1.031 4

表 3 土壤氮素空间变异理论模型与相关参数

项目	模型类型	块金值	基台值	块金效应/%	变程/m
全氮	高斯模型	0.231	0.162	58.97	1 234.7
硝态氮	高斯模型	0.681	0.398	63.19	28 800
铵态氮	高斯模型	0.057	0.114	50.13	28 971

### 2.3 土壤氮素的空间分布格局

图 1 是流域土壤氮素含量的空间布局插值图,从

图 1 中可以直观地看出:全氮空间分布以斑块状分布居多(图 1a),并由宕昌县的益哇乡和腊于乡向东南逐级递减,含量相对较高( $\geq 1.63 g/kg$ )的区域分布范围较广,约占研究区总面积的 63.56%,局部地区有零星高值分布;硝态氮含量分布趋势和全氮含量分布相似(图 1b),空间分布主要呈条带状分布,各个等级含量面积差异波动性不大,高值区主要位于西北的

达拉乡;铵态氮含量分布趋势与前两者正好相反,表现为由东北部和西南一隅分别向西北和东南 2 个方

向呈阶梯状递减(图 1c),中值以下水平( $\leq 2.07 \text{ g/kg}$ )分布较广,占研究区总面积的 82.48%。

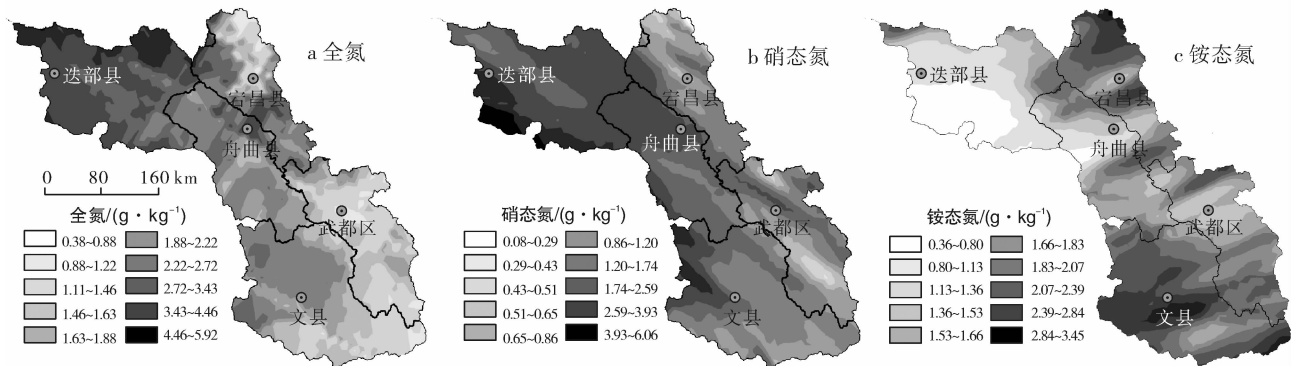


图 1 研究区土壤氮素空间分布

2.4 不同土地利用方式下土壤氮素含量状况

土地利用是人类利用土地进行各种生产活动的综合反映,土地利用方式不同使得土壤氮素含量存在一定差异。考虑到研究区数据的可获得性、研究区自然地质灾害频发的特点,故选取林地、草地和耕地为研究区主要土地利用类型。方差分析统计结果表明(表 4),土地利用方式对土壤氮素具有不同程度的影响。土地利用方式对土壤全氮含量的影响达到显著水平( $F=3.57, p=0.03$ ),对土壤硝态氮含量的影响达到极显著水平( $F=8.50, p=0.000$ ),对土壤铵态氮含量的差异性不明显( $F=0.945, p=0.391$ )。3 中不同土地利用方式下,土壤全氮含量呈现林地>草地>耕地的趋势;土壤硝态氮含量耕地显著高于草地和林地;土地利用方式对土壤全氮和硝态氮的影响程度远大于土壤铵态氮的影响。

表 4 不同土地利用方式土壤氮素的均值与方差 g/kg

项目	耕地	草地	林地	F 值
全氮	1.79 <sup>c</sup>	2.14 <sup>b</sup>	2.49 <sup>a</sup>	3.57 <sup>*</sup>
硝态氮	2.19 <sup>a</sup>	1.14 <sup>c</sup>	1.39 <sup>b</sup>	8.50 <sup>**</sup>
铵态氮	1.74 <sup>a</sup>	1.60 <sup>a</sup>	1.59 <sup>a</sup>	0.94

注:所列数值是测定的数学平均值;小写字母代表 0.05 显著水平; \*\* 代表 0.01 显著水平; \* 代表 0.05 显著水平。

2.5 不同海拔高度下土壤氮素含量状况

研究区海拔高度在 600~4 828 m 之间,采样点在 1 000~2 500 m 之间居多,随着海拔高度的变化,土壤氮素含量表现出不同差异。统计结果表明土壤全氮在 6 种海拔高度等级中存在极显著性差异( $F=4.971, p=0.000$ )(图 2),均值大小表现为( $>3 000 \text{ m}$ )>(2 500~3 000 m)>(2 000~2 500 m)>(1 500~2 000 m)>(1 000~1 500 m)>(<1 000 m);土壤硝

态氮含量则是( $1 000 \sim 1 500 \text{ m}$ )>(2 500~3 000 m)>(2 000~2 500 m)>(<1 000 m)>(1 500~2 000 m)>(>3 000 m),且后 3 个海拔梯度之间并无显著差异;土壤铵态氮含量在各个海拔梯度内差异性不明显( $F=0.567, p=0.173$ )。综合分析可知,随着海拔的增加,研究区的土壤全氮含量呈现明显增加的趋势,土壤硝态氮含量的减少趋势不明显,土壤铵态氮含量表现为减少趋势。

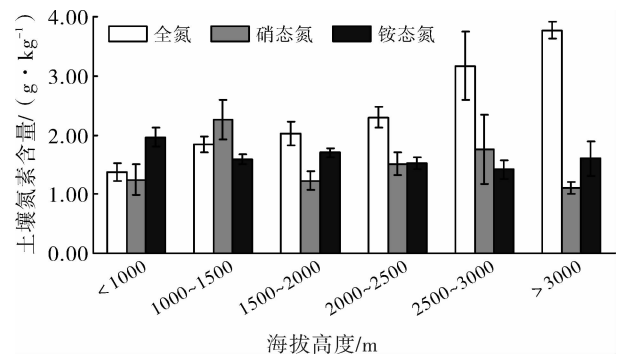


图 2 不同海拔高度对土壤氮素含量的影响

3 讨论

研究结果显示,甘肃省白龙江流域内土壤氮素具有中等的空间相关性,主要受土地利用、耕作施肥等随机性因素和地形、气候等结构性因素的共同影响。本研究主要选取土地利用类型和海拔高度主导因子来探讨土壤氮素空间变异特征。

3.1 不同主导因子土壤氮素空间变异特征比较

3.1.1 土地利用方式 本研究发现土壤表层全氮含量:林地>草地>耕地,结果与刘好<sup>[16]</sup>和杨小林等<sup>[17]</sup>研究结果相似。主要是因为研究区林地(主要为针叶林和阔叶林)和草地(多为荒草地)受人为扰动

较小,枯枝落叶和凋落物等有机质在土壤表层富集,进一步增加了表层土壤全氮的含量。相反,县城城区中心及其附近,土壤全氮和含量相对较低,主要原因是人类活动扰动较大;其次,耕地(例如武都区和宕昌县耕地大块连片分布区域)土壤通透性好,全氮流失相对较快,全氮含量相对较低。研究区内耕地硝态氮和铵态氮含量高于草地和林地,可能有更重要的因素(施用铵态和硝态氮肥、对耕地的投入与管理、灌溉等)影响着硝态氮和铵态氮的含量。

3.1.2 海拔高度 本研究发现,土壤全氮含量随海拔高度的升高而增加,这一结论与刘合满等<sup>[18]</sup>研究结论相似,与张振国等<sup>[19]</sup>研究结果恰好相反。土壤硝态氮和铵态氮含量均随海拔高度的增加而降低,与邓欧平等<sup>[20]</sup>的研究结论一致,与刘合满等<sup>[18]</sup>和刘好<sup>[16]</sup>研究结果相反。可能的原因是随着海拔的增加,温度随之降低,土壤中微生物分解速率减小,因此海拔较高区域土壤全氮比较富集;同时随着温度的降低,氮素的转化效率降低,故硝态氮和铵态氮含量较低。部分区域(<1 500 m)硝态氮和铵态氮含量较高可能是因为采样时间在 7—8 月,研究区正处于雨季,降雨形成的径流对土壤表层的冲刷和垂直淋洗使硝态氮和铵态氮流失,进而向海拔低处聚集。

### 3.2 相应的管理措施与展望

根据全国第二次土壤普查制定的肥力分级标准<sup>[21]</sup>,研究区大部分区域土壤氮素含量较高(处于 I 级或 II 级水平)。因此,流域土壤氮素的管控重点是提高氮素利用率,并在低值农耕区(县城中心及其附近)增加氮肥投入。考虑到流域内自然地质灾害频发等特点,大力推进退耕还林政策和生态工程建设,同时合理耕作(免耕或少耕),以减少氮肥施用量;鼓励施用农家肥,防止化学氮肥过量施用诱发土壤板结和水体污染等。

本文仅对流域土壤表层氮素的空间变异特征做了初步分析,不同土壤深度层次的土壤氮素含量分布还有待进一步研究。另外,文章仅考虑了土地利用方式和海拔高度主导因素来分析土壤氮素含量变化,建议未来研究将植被类型、耕作方式、施肥与管理等因素纳入考虑。

## 4 结 论

(1) 流域土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量总体处于中高水平,3 种养分的变异强度为:硝态氮>全氮>铵态氮,均属于中等强度变异。其中,全氮和硝态氮属于对数正态分布,铵态氮属于正态分布。

(2) 土壤氮素含量具有明显的空间变异特征,半

方差模拟结果可知,三者均符合高斯模型。土壤全氮、硝态氮和铵态氮均表现出中等变异,主要受随机性因素和结构性因素的共同影响。且与土地利用类型和海拔高度关系密切。

(3) 土壤氮素含量空间分布格局明显,土壤全氮空间分布表现为斑块状格局,硝态氮和铵态氮则表现为斑块状格局。含量由低到高分布的梯度趋势仍然存在。故对研究区内的氮素调控措施应针对性地分区进行,从而实现避免农耕区高值区过度施肥和低值区得不到补充的局面。

### [参 考 文 献]

- [1] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1547-1555.
- [2] Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Zhang Xudong, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of North-east China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 19-29.
- [3] 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间变异性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 89-96.
- [4] Ruffo M L, Bollero G A, Hoefl R G, et al. Spatial variability of the Illinois soil nitrogen test: Implications for soil sampling [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(6): 1485-1492.
- [5] 陈肖,张世熔,黄丽琴,等. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 1-7.
- [6] Wang Yunqiang, Zhang Xingchang, Huang Chuanqin. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2009, 150(1/2): 141-149.
- [7] 陈冠,孟兴民,乔良,等. “7·22”岷县漳县地震地质灾害分布、特征及与影响因子间关系分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 750-760.
- [8] 祝锦霞,许红卫,王珂,等. 基于 GIS 和地统计学的低丘红壤地区三种土壤性质空间变异性研究[J]. 土壤, 2008, 40(6): 960-965.
- [9] 史舟,李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [10] 孔毅,刘国顺,腊贵晓,等. 小尺度下基于 GIS 和地统计学的烟田土壤养分空间变异[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 317-320.
- [11] Webster R, Oliver M A. *Statistical methods in soil and land resources survey*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [12] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.

(下转第 155 页)

的屋顶绿化本身也具有多种生态环境效益<sup>[3]</sup>。随着人们对这些生态环保效益的深入认识,有助于克服屋顶绿化相对较高的建造成本带来的推广应用阻力。这对中低收入的国家快速发展屋顶绿化事业有现实意义。因此,可以预测,本文使用的建筑垃圾基材栽种景天植物的技术方案有较好的应用前景。

用建筑垃圾代替陶粒配制屋顶绿化基材,唯一的缺点是重量有所增加。但由于配制拓展型屋顶绿化基材栽种景天植物时,基材厚度很小(本文才4 cm),每1 m<sup>2</sup>的干重量不到50 kg,即使考虑基材吸水饱和后的重量增加,也不到70 kg。这个重量对多数已有建筑屋顶都可以承受,不必对屋面结构进行加固处理。因此,建筑垃圾配制的拓展型屋顶绿化基材的应用范围将十分广泛。

### 3.2 结论

(1) 建筑垃圾基材栽种的2种景天植物早期有更好生长效果,后期与陶粒配制的基材无显著差异;表明建筑垃圾能取代陶粒用于配制拓展型屋顶绿化基材。

(2) 栽种植物18个月后,建筑垃圾基材的全磷、全钾养分含量减少与陶粒基材无显著差异;全氮养分含量减少量小于陶粒基材。

(3) 植物盖度随时间逐步增大。试验结束时,同种基材上栽种的佛甲草的盖度和干重显著高于垂盆草。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau Troisdorf. Guidelines for the planning, construction and

maintenance of green roofing: Green roofing guideline[M], Germany: FLL, 2008.

- [2] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006,77(3):217-226.
- [3] Dunnett N, Kingsbury N. *Planting Green Roofs and Living Walls* [M]. Portland, USA: Timber Press, 2004.
- [4] 叶建军,余世孝,刘文利,等. 屋顶绿化初绿化基材配方研究[J]. *水土保持通报*, 2010,30(4):157-162.
- [5] 叶建军. 屋顶绿化的植物筛选及生态服务功能研究[D]. 广州:中山大学,2013.
- [6] Molineux C J, Fentiman C H, Gange A C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK[J]. *Ecological Engineering*, 2009,35(10):1507-1513.
- [7] Ye Jianjun, Liu Chuanyin, Zhao Zichao, et al. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive greens roofs[J]. *Ecological Engineering*, 2013,55(2):29-34.
- [8] 叶建军,许文年,余世孝. 屋顶绿化系统及绿化方法:中国, ZL200910063086.1[P]. 2009-12-23.
- [9] Teemusk A, Mander U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia [J]. *Building and Environment*, 2009,44(3):643-650.
- [10] 周媛,徐冬云,董艳芳,等. 9种轻型屋顶绿化景天属植物的抗旱性研究[J]. *中国农学通报*, 2012,28(25):294-301.

(上接第150页)

- [13] 陈光,贺立源,詹向雯. 耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究[J]. *土壤通报*, 2008,39(5):1007-1011.
- [14] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究:以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000,11(4):557-563.
- [15] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994,58(5):1501-1511.
- [16] 刘好. 甘肃省土壤全氮含量空间分布及与土地利用的关系[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010.
- [17] 杨小林,李义玲,朱波,等. 紫色土小流域不同土地利用

类型的土壤氮素时空分异特征[J]. *环境科学学报*, 2013,33(10):2807-2813.

- [18] 刘合满,曹丽花,曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征[J]. *生态学报*, 2016,36(1):1-7.
- [19] 张振国,黄建成,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工柠条林土壤养分特征及其空间变异[J]. *水土保持通报*, 2007,27(5):114-120.
- [20] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. *资源科学*, 2013,35(12):2434-2443.
- [21] 全国土壤普查办公室. *中国土壤普查技术*[M]. 北京:农业出版社,1990.