

干旱荒漠区污水灌溉山地园林土壤养分的空间变异特征

张慧文^{1,2}, 孙涛³, 张自文⁴, 马剑英^{1,5}, 陈发虎¹, 吕光辉²

(1.兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.新疆大学教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3.新疆农科院中心实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4.兰州蓝天浮法玻璃股份有限公司人力资源部, 甘肃 兰州 730060; 5.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以乌鲁木齐市雅玛里克山污水灌溉区为例,采用地统计学方法研究了干旱荒漠区山地园林污灌区土壤中的6种土壤养分指标全N、全P、全K、速效N、速效P、速效K的空间变异特征。结果表明,6种土壤养分指标的变异系数在8.34%~39.68%之间,全N、全P、速效P服从正态分布,全K、速效N、速效K服从对数正态分布。所有养分的块金值与基台值之比都在25%以下,说明结构性因素控制这些养分的含量分布,导致样点之间的空间自相关作用强。土壤养分的相关距变化范围为19.1~116.7 m。因为灌溉污水的影响,强矿化作用使得全N、速效N在质地粗轻的山坡含量较高,而氨挥发则造成全N、速效N在质地细重的谷地含量较低,偏弱碱性的污水加剧了P的固定,使研究区内全P、速效P含量整体偏低,但同时偏弱碱性的污水促进了K的释放,使速效K含量明显提高。污灌能促进速效养分的释放,使养分之间具有一定相关关系。

关键词:污水灌溉;土壤养分;地统计学;空间变异;克里格插值

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)06-1164-08

Spatial Variability Characteristics of Soil Nutrients in Wastewater Irrigated Mountain Garden in Arid Desert Area

ZHANG Hui-wen^{1,2}, SUN Tao³, ZHANG Zi-wen⁴, MA Jian-ying^{1,5}, CHEN Fa-hu¹, LV Guang-hui²

(1.Key Laboratory of Western China's Environmental Systems(Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Key Laboratory of Oasis Ecology(Ministry of Education), Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3.Center Laboratory of Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830046, China; 4.Lanzhou Blue Sky Float Glass Co.ltd, Human Resources Dept. Lanzhou 730060, China; 5.Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Yamalic mountain in the northwest of Urumqi, is a typical arid desert area of West China. Now the Yamalic mountain garden building was not only the national landscaping demonstrative base, but also the demonstrative project to restore the ecological environment of Xinjiang. It was the first time to afforest the barren hill with the secondary treated urban wastewater in Xinjiang. This project would not only supply Yamalic mountain with reliable and stable water resources, but also create an effective way to reclaim urban wastewater in this arid desert area of West China. Understanding the spatial variation and distribution pattern of soil nutrients in wastewater irrigated regions is needed in order to provide a scientific basis for developing rational wastewater irrigation methods. Based on local landforms, 61 soil samples(0~20 cm)were collected, and six soil nutrients including total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), total potassium(TK), available nitrogen(AN), available phosphorus(AP) and available potassium(AK) were measured. Geostatistical and GIS techniques were used to analyze the spatial variability of soil nutrients in this region. The statistical characteristics of data were analyzed using SPSS 16.0, the procession of semivariograms calculation and theoretical models fitting were done by GS+5.3, and the spatial distribution map of all soil nutrients was created using ordinary Kriging methods, ArcGIS9.2. Traditional statistical analysis(descriptive statistics) showed the coefficients of variation for all soil nutrients ranged from 8.34% to 39.68%. All soil nutrients belonged to medium variation except that TK belonged to weak variation. TN, TP and AP showed a normal distribution, while TK, AN and AK showed a lognormal distribution. The ratios of nugget to sill for the six soil nutrients were all under 25%, indicating that the spatial

收稿日期:2008-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40671195,40421101,90502008);国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB421306)

作者简介:张慧文(1978—),女,甘肃兰州人,博士生,主要研究方向为干旱区环境变化和环境科学。

通讯作者:陈发虎 E-mail:fhchen@lzu.edu.cn

correlations were all strongly spatially dependent and their spatial heterogeneity was mainly caused by structural factors. The range of spatial correlation distance for all soil nutrients was between 19.1 m and 116.7 m. The above results showed that wastewater irrigation could not strongly influence the spatial correlations and could not improve the content of soil nutrients in a short period in the study area. The content of TN and AN were higher on the hillside because of strong mineralization and lower in the valley because of ammoniacal volatilization, which was caused by wastewater irrigation. The fixation of phosphorus occurred because of slightly alkaline wastewater irrigation. Therefore, the content of TP and AP were low in the whole study area. At the same time, slightly alkaline wastewater could accelerate the freeing of potassium, after which the content of AK rose noticeably. There were certain correlations between nutrients because the wastewater could release its available nutrients.

Keywords: wastewater irrigation; soil nutrients; geostatistics; spatial variability; kriging

我国是一个水资源匮乏的国家,2007 年全国水资源总量为 25 255 亿 m^3 ,居世界第 6 位,但人均水资源量不足 $2\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{人}^{-1}$ (按 13 亿人口计算),仅为世界人均占水量的 1/4,世界排名 100 位以后,被列为全球 13 个人均水资源贫乏的国家之一^[1]。再生水资源和污水资源化是目前人类解决水资源危机的重要出路,不仅开辟了第二水源,还可充分利用污水的水肥资源为植物提供所需的养分,从而提高污水处理能力、生态效益和社会经济效益。研究污水灌溉对土壤养分空间分布格局的影响,地统计学提供了很好的手段。

地统计学是以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性、或空间相关和依赖性的自然现象的科学^[2]。20 世纪 80 年代初,Burgess 及 Webster 等将区域化变量理论引入到土壤性质空间变异性研究中^[3]并加以丰富和完善,使之定量化,从而大大地推动了这一研究的向前发展,现在这一研究已成为土壤科学研究领域的最前沿热点之一^[4-6]。我国 20 世纪 90 年代中期以后开展了土壤养分空间变异与分布的定量研究,徐吉炎和 Webster^[7]最先利用地统计学研究了土壤全 N 的分布。以后的研究者多在中、小尺度上对耕地的土壤养分变异与分布进行研究^[8-10]。大尺度(例如县级)土壤养分空间变异性研究主要集中在东北黑土区^[11]、黄土高原流域^[12]、黄淮海冲积平原区^[13]、山东省潮土区^[14]、太湖流域典型地区^[15]、江苏稻麦轮作区^[16]、南方低丘红壤地区^[17]、横断山北部生态脆弱区^[18]、江津紫色土壤^[19]、甘肃河西灌漠土^[20]、宁夏灌淤土^[21]、内蒙古干旱荒漠区^[22]、北京周边^[23]、河北省遵化平原^[24]等,大多为县级尺度,面积从几十到几千平方公里,主要揭示了区域因素如气候、土壤类型、地形地貌、土地利用类型、土壤侵蚀等对土壤养分的空间变异的影响,也有以村级为对象的土壤养分空间变异性的研究^[25]。近些年来 GIS 和 GPS 技术的发展为研究相对较大尺度上土壤特性的空间变异性提供了准确便捷的工具^[26]。在影响土壤养分空间格局的众多因素中,有的研究者认

为主要受人为因素干扰^[27],有的研究者则认为是作物品种、施肥水平和管理方式等人为随机因素和成土母质、土壤类型、气候、水分条件等非人为因素的共同影响^[28]。在污水灌溉条件下研究者主要集中于重金属空间变异方面的研究,如应用于土壤重金属的采样设计^[29]、空间结构分析及制图^[30]、空间插值与土壤环境质量评价^[31]和最优插值方法的选择^[32],其目的是揭示重金属的分布、追踪污染物来源、进行土壤环境质量评价并提出合理的治理措施等。王学军对北京东郊通惠河畔污灌土壤的研究发现粘粒和有机质的空间分布特征与各微量元素有相似之处,认为部分是因为污灌带来的污染物颗粒和有机质在农田逐渐累积的影响^[33]。另外很少有学者开展污灌区土壤养分的空间变异研究。

国家级绿化示范基地乌鲁木齐市雅玛里克山园林是新疆恢复生态环境建设项目的示范工程,用经过二级处理的城市生活污水绿化灌溉荒山在新疆尚属首次。这一举措既能为雅山提供可靠和稳定的水源,又为西部干旱地区绿洲城市污水资源化创造了有效途径。本研究采用地统计学方法进行干旱荒漠区山地园林污水灌溉区土壤养分的空间变异性分析,可以揭示经污水灌溉后土壤氮磷钾养分的空间变异规律,为制定合理的污灌方式提供科学的依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

雅玛里克山(以下简称雅山)位于乌鲁木齐市西北部,地理位置:东经 $87^{\circ}33'16''\sim 87^{\circ}34'56''$,北纬 $43^{\circ}45'44''\sim 43^{\circ}47'25''$ 。该地区属于中温带大陆干旱气候区,温差大,降水少,全年盛行北风和西北风,年均风速 $2.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风力 9 级。年均气温 $6.6\ ^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $266.9\ \text{mm}$,蒸发量却高达 $2\ 731.0\ \text{mm}$ 。雅山为低山丘陵荒漠地貌,山体主要由河流相灰色砾石层和亚砂土或亚粘土互层组成,土层发育薄弱,土壤类型为碱性的栗钙土和棕钙土。山峦呈东北西南走向,

地势南高北低,外缘周长约为16 km,山体周边面积16.2 km²,山区地表面积40 km²,可绿化面积20 km²。主峰海拔1 397.6 m,山体比市区相对高超过500 m,位于市区的上风,是乌市降尘的主要来源区。未绿化前雅山的降尘量一度占全市大气降尘量的90%以上,自1996年6月启动了雅山绿化工程以来,到2004年有监测数字表明,乌市沙区总悬浮颗粒物比2000年降低了0.12 mg·m⁻³,来自雅玛里克山的降尘量比2000年减少了1.33 t·km⁻²·月⁻¹,可见绿化雅山对于改善乌鲁木齐市的生态环境具有战略性意义^[34]。

至2007年雅山绿化工程已完成造林绿化面积近9.2 km²,植树65万余株,树种达到60余种,如蟠桃树、李子树、苹果树及榆树、杨树等,树木成活率达到92%。灌溉用水为雅山污水处理厂二级出水,污水来源主要为城市生活污水,其次为公共设施污水及排入城市下水系统的工业污水,污水水质特征见表1,可知污水处理厂二级出水各污染物浓度均达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中城镇污水处理厂二级标准及《农田灌溉水质标准》(GB 5084—1992和GB 5084—2005)旱作标准。夏季5—9月进行污水灌溉,采用水平沟漫灌、喷灌、滴灌、微喷等多种灌溉方式,同时灵活运用工程节水、生物节水等多种节水方式,已安装滴灌0.53 km²,喷灌1.8 km²。由于山区蒸发量大,每7~10 d为一灌溉间隔,才能保证植被的需水量。研究区域面积约0.75 km²,地形复杂,地势由东南向西北逐渐倾斜,土壤pH为7.26~7.91,为弱碱性土壤或碱性土壤,以碱性土壤居多。有机质含量中等偏上居多。

1.2 土壤样品的采集与分析

所有样品采于2005年4月。研究区域地形复杂,因此采用随机布点取样,在地形较复杂部位增加样点数目,共设61个采样点,每个采样点向四周辐射,呈梅花状采5 m×5 m正方形4个顶点和中心点的表层(0~20 cm)土壤约1 kg,现场均匀混合后用四分法从中选取1 kg土壤作为该点的混合样品,同时用GPS定位中心点位置,图1为样点分布示意图。

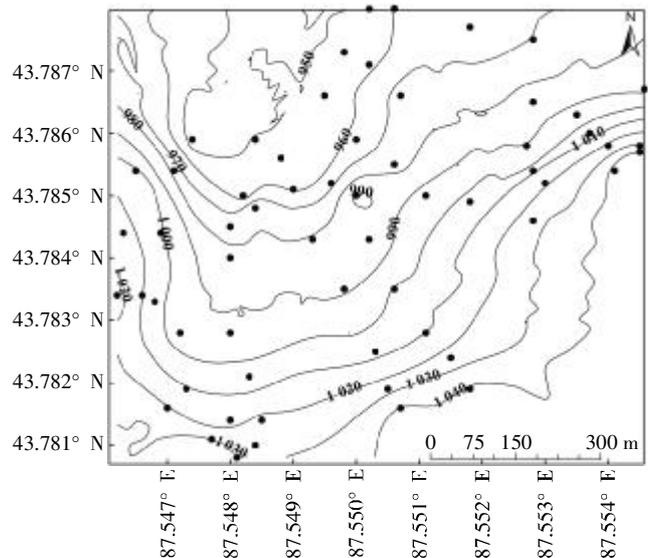


图1 雅玛里克山采样点分布图

Figure 1 Distribution of the sampling sites in Yamalic mountain

选取了全N、全P、全K、速效N、速效P、速效K 6种土壤养分指标。测试方法:全N采用凯氏法,全P采用高氯酸-硫酸酸溶法,全K采用氢氟酸-高氯酸消煮-火焰光度法,速效N采用扩散法,速效P采用碳酸氢钠法,速效K采用醋酸铵-火焰光度法。以上测定方法均参照国家标准方法及新疆土壤理化分析地方标准。

1.3 研究方法

本文采用SPSS16.0进行数据统计分析,半变异函数的计算和理论模型拟合采用GS+5.3软件完成,克立格插值图的生成由ARC GIS9.2软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分指标的描述性统计分析

从表2中可以看出,所有指标的中数和平均数差异不大,说明样本数值受特异值影响较小。土壤养分的变异系数在8.34%~39.68%之间,通常认为变异系数 $c_v \leq 10\%$ 时为弱变异, $10\% < c_v \leq 100\%$ 为中等变异,当 $c_v > 100\%$ 为强变异。因此除全K属于弱变异其他指

表1 生活污水水质特征

Table 1 Quality characteristics of the municipal wastewater

项目	pH	色度	悬浮物	COD _{Cr}	BOD	石油类	动植物油	阴离子洗涤剂	硫化物	总磷
污水	7.78	10	24	38.4	13.0	0.03	0.02	0.194	<0.020	0.436
标准	5.5~8.5	80*	100	200	100	10	15**	8.0	1.0	10**

注:单位为mg·mL⁻¹,pH无量纲,*表示《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中城镇污水处理厂二级标准,**为《农田灌溉水质标准》(GB 5084—1992)旱作标准,其他为《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)旱作标准。

表 2 土壤养分指标的统计特征值

Table 2 The statistical characters of soil nutrients

土壤养分	平均值	中数	标准差	方差	变异系数/ %	峰度	偏度
全 N	1.08	1.05	0.39	0.16	36.34	1.18	0.14
全 P	0.26	0.25	5.57E-2	3.10E-3	21.33	-0.32	0.18
全 K	19.65	19.91	1.64	2.69	8.34	5.83	-1.85
速效 N	57.19	51.20	22.69	514.99	39.68	3.32	1.75
速效 P	3.59	3.40	1.30	1.70	36.25	-0.38	0.27
速效 K	343.83	325.20	96.13	9 240.86	27.96	0.73	1.04

注: N、P、K 全量要素单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; N、P、K 速效量要素单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

标都属于中等变异,可能是漫灌的污灌方式导致土壤养分分布较均匀和人工种植的植被覆盖状态比较稳定造成变异系数较小。

平均值与中值大致相等可以说明数据服从正态分布^[35],从表 2 中可以看出全 N、全 P、速效 P 都接近正态分布,全 K、速效 N、速效 K 为偏态分布。对于不符合正态分布的土壤指标在 GeoStatistical Analyst 模块中的 Explore Data 将数据取对数后使其呈对数正态分布,然后进行变异函数的计算,从而消除了比例效应^[35]。

2.2 土壤养分指标空间变异特征

计算出 $\gamma(h)-h$ 的散点图之后,分别用不同类型的模型来进行拟合,得到模型的参数值。最佳模型选择的判断标准为:均差应接近于 0、均方根预测误差和平均标准误差尽可能小、标准均方根预测误差接近于 1^[35],最后用交叉验证法来修正模型的参数,结果见表 3。

区域化变量空间相关性程度的分级标准^[36]: $C_0/Sill < 25\%$ 变量具有强烈的空间相关性,结构性因素控制分布; $C_0/Sill$ 在 $25\% \sim 75\%$ 为中等空间相关,结构性因素和随机性因素共同作用,结构性因素如气候^[37]、

表 3 土壤养分的理论模型和相应参数

Table 3 The theoretical models of soil nutrients and corresponding parameters

土壤养分	理论模型	块金值 C_0	基台值 sill	变程 a/m	(块金值/基台值)/%	RSS	R^2
全 N	S	0.000 1	0.148 2	99.4	0.07	4.86E-3	0.861
全 P	S	0.000 28	0.002 42	116.7	11.5	5.76E-7	0.873
全 K	G	0.100	2.609	115.7	3.83	1.71	0.835
速效 N	S	73.0	455.0	110.8	16.04	22 717	0.654
速效 P	E	0.231	0.174 2	78.6	13.26	8.81E-4	0.883
速效 K	G	0.001	0.060 5	19.1	1.65	1.12E-3	0.561

注: G-高斯模型, E-指数模型, S-球状模型。

母质^[38]、地形^[39]、土壤类型^[40]等可以导致土壤养分强的空间相关性,而随机性因素如施肥、耕作方式、种植制度等各种人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱,朝均一化方向发展; $C_0/Sill > 75\%$ 变量空间相关性弱。表 2 中所有养分的块金值与基台值之比都在 25% 以下,说明结构性因素控制这些养分含量的分布,导致样点之间的空间自相关作用强。变程表示区域化变量 $Z(x)$ 空间自相关范围大小,在间隔距离 $|h| \leq a$ 内变量性质相关,在间隔距离 $|h| > a$ 外变量独立^[2]。研究区域土壤养分变程为 19.1~116.7 m,可见研究区内人为的污水灌溉和耕作活动等随机性因素没有强烈影响土壤养分的空间相关性,但是土壤性状不均一,存在着一定的空间异质性。

2.3 土壤养分指标的空间分布格局

新疆棕钙土的全 N 含量为 0.67~11.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 1.07 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解 N 含量为 27~60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全 P 含量为 0.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 P 含量为 3~7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全 K 含量为 19.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 K 含量为 90~260 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。栗钙土的全 N 含量为 1.42~3.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效 N 含量为 23.0~152.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全 P 含量为 0.6~1.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 P 含量为 3~5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全 K 含量为 14.0~21.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 K 含量为 220~335 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究区的全 N 含量为 0.044~2.178 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 1.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 N 含量为 30.7~140.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 57.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较棕钙土有所增加。全 P 含量为 0.14~0.38 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 0.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 P 含量为 1.0~6.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 3.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与全疆平均值相比没有什么变化。全 K 含量为 12.29~22.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 19.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 K 含量为 209.0~618.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 343.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效 K 含量较新疆棕钙土和栗钙土增加很多。研究区从 2002 年开始污水灌溉,灌溉历史较短,所以污水灌溉在短时期内没有明显提高土壤全量养分含量,但利于速效养分积累。相关分析表明全 N 与速效 N 较显著相关 ($r=0.575, P<0.01$), 全 P 和速效 P 弱相关 ($r=0.306, P<0.05$), 速效 N 与速效 K 弱相关 ($r=0.322, P<0.05$), 以前的研究结果中未见类似的养分相关性报道,看来是由于污水灌溉造成了全量和速效养分间的这种相关性。

全 N 和速效 N 含量分别以 0.75~1.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40.00~90.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 居多,属于中等含量范围。图中二者的分布趋势较一致,含量都从东南向西北减少,高值都出现在海拔较高的山腰处,有随海拔高度下降而减小的趋势。山顶上没有人工植被覆盖,淋溶引起

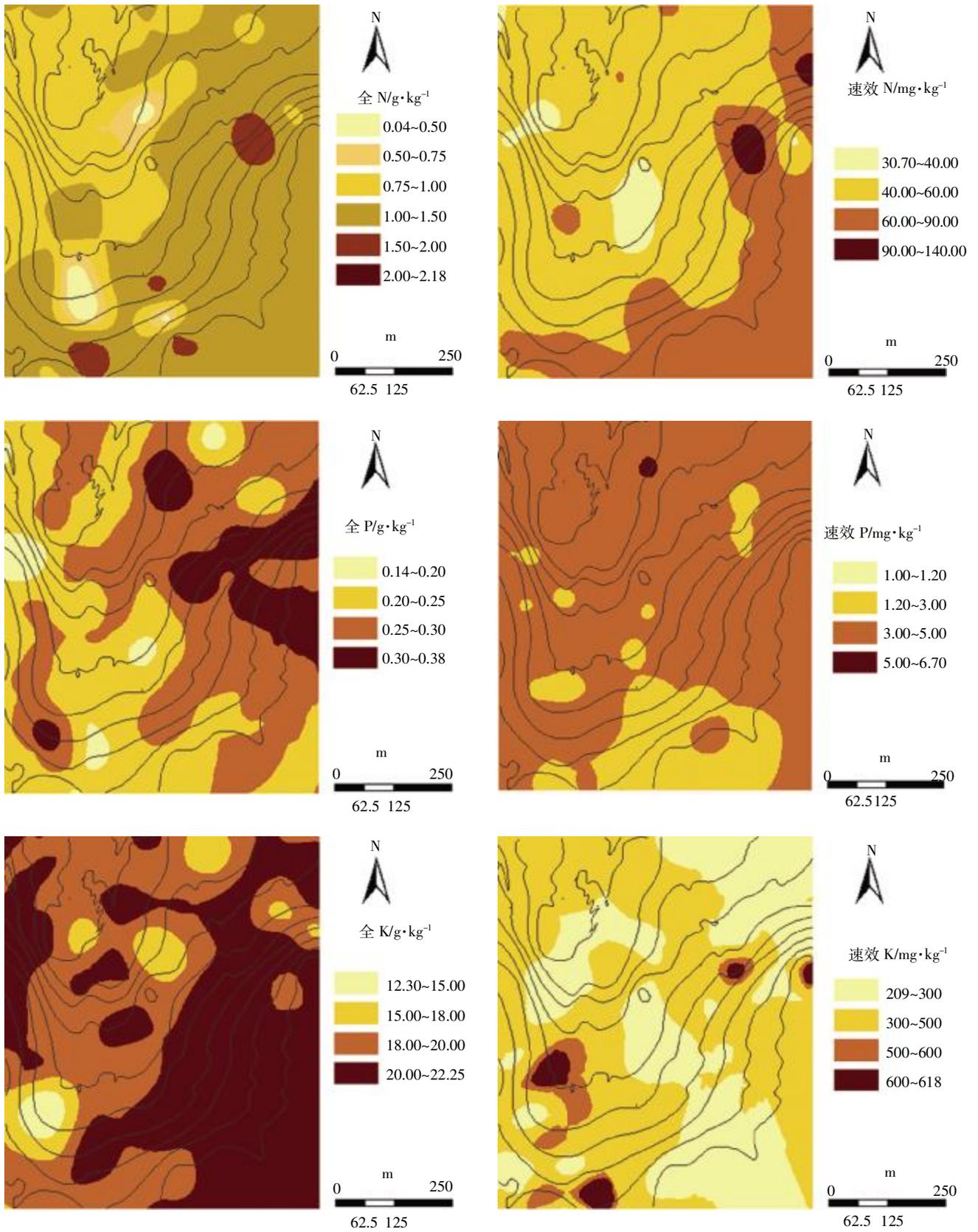


图2 土壤养分的空间分布图

Figure 2 The spatial distribution map of soil nutrients

的土壤固体物的流失易造成氮的损失,尤其对于坡度较大的山地来说更为严重。山坡栽种了人工植被,长势良好,沿等高线人工开凿深度和宽度都约为 0.5 m 的水平沟进行污水灌溉。夏季的水热条件有利于土壤有机氮的矿化,研究区的污水灌溉正是在夏季 5—9 月,在适当的水热条件下,污水中有机氮通过矿化和生物作用转化为无机氮增大了氮含量。山谷低洼处由于经常处于淹水状态,偏弱碱性污水易使氮素以氨的形式挥发,且氨挥发潜力随土壤 pH 升高而变大,从而造成氮素损失。另外低洼处结构性差的土壤,大土块较多且僵硬,泡水后不易化开,氮素矿化比较慢,难以变为有效 N。有研究^[42]认为同一地区粘重土壤大多分布在地形部位较低处,土壤通气状况较差,有机质分解较慢,质地轻粗的土壤则分布在地形部位较高处,粘粒含量高和排水条件差的土壤氮素含量常高于粘粒含量低和排水条件好的土壤,本研究中却与之相反,究其原因主要是污水灌溉造成了这种完全不同的分布格局。为了保持和不断提高土壤氮素水平,必须实行合理的灌溉制度。对于研究区内石灰性土壤,阴天或夜间进行污水灌溉可以减少高温光照引起的氨挥发的损失,同时调节污水的用量,减少漫灌造成水土流失,避免污水下渗造成低洼处淹水。夏季土壤生物活性高,有机氮的矿化快,植物生长盛期对土壤中矿质氮的吸收能力最强,从而减少氮的损失和在土壤中的残留,且植被的郁闭度还能抑制氨挥发,此时灌溉的污水中适当降低去氮率或者添加氮肥可以提高氮的利用率,降低对环境的污染。

全 P 和速效 P 含量分别以 $0.20\sim 0.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.00\sim 5.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 居多,属于贫 P 范围。二者随海拔高度变化不明显,与坡向也没有多大关系。全 P 整体呈现从东到西减少的趋势,与研究区内土地从东到西开发力度减弱有关。磷的分布格局受成土母质影响较大,污水灌溉的贡献很小,因为污水中全 P 含量极低。磷含量低的原因是研究区土壤呈碱性,含有大量 Ca^{2+} ,与磷形成一系列钙-磷化合物而固定,移动性差,使磷肥利用率下降,而且偏弱碱性的污水更加剧了磷的固定。在扩大贫 P 土壤有效 P 库的目的下,首先可以适当调节污水的 pH 值至中性,这样可以增加土壤中磷酸钙的溶解度,降低碳酸钙对磷的吸附,提高供磷强度。充分的磷供给有助于增强植被的抗逆性和提高产量,如果缺磷还会影响植物对氮的吸收^[43],在植物生长旺季应提高污水中磷的含量即降低去磷率或者添加化学磷肥和有机肥料。持续的、略为过量

的施用磷肥是提高土壤供磷力的根本途径,过量的磷既不会流失也不会最终失去有效性,将会具有持久性的残效。另外还可以通过人类活动提高土壤有机质含量和土壤熟化程度,因为土壤有机磷含量与有机质含量有极好的相关性^[43]。

全 K 和速效 K 含量分别以 $18.00\sim 22.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $209.00\sim 500.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 居多,含量较高,二者的分布随海拔高度和坡向变化均不明显,主要是受成土母质中所含矿物的控制。因为新疆土壤风化和淋溶较弱,富含原生矿物云母,而云母是提供缓效性钾的主要矿物,因此钾素含量普遍丰富^[41]。土壤水分胁迫会降低钾从土壤到根的扩散速率,从而降低钾的有效性,而淹水能促进有效 K 的释放,提高钾的有效性,干湿交替情况下较之连续渍水时能释放更多钾^[43]。研究区的土壤多为砂土并混杂很多砾石,这种土壤不能保持水分易使钾的有效性降低,应该施行少量多次的污水灌溉方式以避免积水。土壤酸碱性显著影响钾的有效性,pH 越低固钾作用越弱,而 pH 过高也会造成有效 K 的降低^[43]。研究区灌溉的污水 pH 为 7.78,能有效促进 K 的释放,所以速效 K 含量比背景值明显增大很多。过量的钾可能和水溶性磷生成沉淀,影响当季磷的有效性,但是磷却在土壤钾的转化和释放过程中起重要作用^[43],另外氮的存在也会促进钾的释放及植物对钾的吸收和利用^[43]。虽然目前研究区内钾素较为丰富,但是如果仅依靠自身的循环,随着植被对土壤钾的移出,以后还是有可能出现缺钾现象,因此必须重视钾素平衡,实行合理的灌溉制度,应重视氮、磷和钾的相互促进作用,在植物生长旺期应适当增加污水中无机、有机钾源以及氮、磷肥,互相促进释放和吸收,避免旱涝造成养分的淋失和有效性降低。

3 结论

(1)研究区内土壤养分含量整体较低,由于污水灌溉历史较短,污水灌溉并没有明显提高土壤养分含量,甚至造成山谷低洼处氮素的挥发损失,但是能提高速效养分的含量,使养分之间具有一定相关关系。土壤养分指标的变异系数变化范围在 $8.34\%\sim 39.68\%$ 之间,全 K 属于弱变异,其他的都属于中等变异。

(2)土壤养分的块金值与基台值之比都在 25% 以下,说明空间自相关作用强,结构性因素控制空间分布格局。随机性因素如人为的污水灌溉和耕作活动对土壤养分的空间相关性影响不强,但是土壤性状不均一,存在着一定的空间异质性。

(3)通过克里格插值所形成的土壤养分含量的变化图,能够较准确地反映研究区土壤6种养分含量的空间分布情况。受灌溉污水的影响,强矿化作用使得全N、速效N在质地粗轻的山坡含量较高,而氨挥发则造成全N、速效N在质地细重的谷地含量较低,偏弱碱性的污水加剧了磷的固定,使研究区内全P、速效P含量整体偏低,但同时偏弱碱性的污水促进了K的释放,使速效K含量明显提高。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2007)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
The Ministry of Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin(2007)[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [2] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
WANG Zheng-quan. Geostatistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [3] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, I, The semivariogram and punctual kriging[J]. *J Soil Sci*, 1980, 31:315-331.
- [4] Kolliss V J, Kalivas D P, Yassoglou N J. Mapping the soil resources of a recent alluvial plain in Greece using fuzzy sets in a GIS environment[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50:261-273.
- [5] Goovaerts P. Geostatistics tools for characterizing the spatial variability in microbiological and physico-chemical soil properties[J]. *Biology and Fertilization of Soils*, 1998, 27:315-334.
- [6] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89:1-45.
- [7] 徐吉炎, Webster R. 土壤调查数据地域统计的最佳估值研究——彰武县表层土壤含N量的半方差图和块状Kriging估值[J]. 土壤学报, 1983, 20(4):419-430.
XU Ji-yan, Webster R. Studies optimal estimation of soil survey data by geostatistical method——semi-variogram and block kriging estimation of topsoil nitrogen of Zhangwu County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, 20(4):419-430.
- [8] 王学锋, 章衡. 土壤有机质的空间变异性[J]. 土壤, 1995, 27(2):85-89.
WANG Xue-feng, ZHANG Heng. Spatial variation of organic matter in soil[J]. *Soils*, 1995, 27(2):85-89.
- [9] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J]. 土壤, 2004, 36(4):376-381.
LEI Yong-wen, WEI Chang-zhou, LI Jun-hua, et al. Characters of soil nutrient spatial variability in different scale[J]. *Soils*, 2004, 36(4):376-381.
- [10] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 等. 小尺度土壤养分的空间变异及其影响因素探讨——以江苏省无锡市典型城乡交错区为例[J]. 土壤通报, 2006, 37(2):214-219.
ZHAO Yan-feng, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Spatial variation of soil nutrients and its affecting factors at small scale—a case study of peri-urban areas in Wuxi, Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2):214-219.
- [11] 赵军, 刘焕军, 隋跃宇, 等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):41-45.
ZHAO Jun, LIU Huan-jun, SUI Yue-yu, et al. Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in black soil crop area with different scales[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):41-45.
- [12] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土高原流域土壤养分的时空变异及其影响因子[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3):294-299.
QIU Yang, FU Bo-jie, WANG Jun, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients and influencing factors in Loess Plateau[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3):294-299.
- [13] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征[J]. 生态学报, 2002, 22:2041-2047.
ZHANG Shi-rong, HUANG Yuan-fang, LI Bao-guo, et al. The temporal and spatial variability of soil organic matter contents in the alluvial region of Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22:2041-2047.
- [14] 杨玉建, 杨劲松. 潮土区土壤有机质含量的趋势演变研究——以禹城市为例[J]. 土壤通报, 2005, 36(5):647-651.
YANG Yu-jian, YANG Jin-song. The trend variability of soil organic matter content in the salinity region of Yucheng City in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5):647-651.
- [15] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学, 2006, 27(6):1217-1222.
CHEN Xiao-min, WU Hua-shan, SUN Jing-hong. Time-spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(6):1217-1222.
- [16] 宋歌, 孙波. 县域尺度稻麦轮作农田土壤无机氮的时空变化——以江苏省仪征市为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(2):636-642.
SONG Ge, SUN Bo. Spatial and temporal changes of soil inorganic nitrogen in rice-wheat rotation system at county scale——a case study in Yizheng County, Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 28(2):636-642.
- [17] 黄智刚, 胡克林, 唐新莲. 红壤蔗区土壤有效态氮、磷、钾的空间变异[J]. 中国糖料, 2006(1):26-29.
HUANG Zhi-gang, HU Ke-lin, TANG Xin-lian. Spatial variability of red soil available N, P and K in the sugarcane field[J]. *Sugar Crops of China*, 2006(1):26-29.
- [18] 李婷, 张世熔, 黄建元, 等. 横断山北部土壤钾素的区域分布特征[J]. 土壤学报, 2006, 43(2):337-341.
LI Ting, ZHANG Shi-rong, HUANG Jian-yuan, et al. Regional distribution of characteristics of soil potassium in the northern part of the Hengduan Mountains[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2):337-341.
- [19] 朱益玲, 刘洪斌, 江希流. 江津市紫色土中N、P养分元素区域空间变异性研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):138-143.
ZHU Yi-ling, LIU Hong-bin, JIANG Xi-liu. Investigation of the spatial variability of nitrogen and phosphorus in purple soils in Jiangjin City, Sichuan, China[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):138-143.
- [20] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 等. 甘肃省武威地区灌溉土微量元素的时空变异特征[J]. 土壤通报, 2005, 36(4):536-540.
ZHAO Liang-ju, XIAO Hong-lang, GUO Tian-wen, et al. Spatial variability of micronutrients of irrigated desert soil in the Baiyun Village of

- Wuwei Region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4):536-540.
- [21] 李友宏,董莉丽,王芳.宁夏银北灌区灌溉土营养元素空间变异性研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):68-72.
LI You-hong, DONG Li-li, WANG Fang. Spatial variability of nutrients in irrigation-silted soil in north Yinchuan, Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2):68-72.
- [22] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等.干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J].生态学报,2004,24:2776-2781.
HUANG Yuan-fang, ZHOU Zhi-yu, YUAN Xiao-yong, et al. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24:2776-2781.
- [23] 胡克林,余艳,张凤荣,等.北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J].中国农业科学,2006,39(4):764-771.
HU Ke-lin, YU Yan, ZHANG Feng-rong, et al. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4):764-771.
- [24] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与Kriging插值分析[J].地理学报,2000,55(5):555-566.
GUO Xu-dong, FU Bo-jie, CHEN Li-ding, et al. The spatial-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province——semivariogram and kriging analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5):555-566.
- [25] 高义民,同延安,胡正义,等.黄土区村级农田土壤养分空间变异特征研究[J].土壤通报,2006,37(1):1-6.
GAO Yi-min, TONG Yan-an, HU Zheng-yi, et al. Spatial variability of soil nutrients in farm land of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):1-6.
- [26] 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.
GUO Xu-dong, FU Bo-jie, MA Ke-ming, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS——a case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):557-563.
- [27] 刘冬碧,余常兵,熊桂云,等.大比例尺度下土壤的养分特征及其空间变异性研究[J].华中农业大学学报,2004,23(5):524-527.
LIU Dong-bi, YU Chang-bing, XIONG Gui-yun, et al. Study on soil nutrient characteristics and its spatial variability in large scale[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2004, 23(5):524-527.
- [28] 肖鹏飞,张世熔,黄丽琴,等.成都平原区土壤速效磷时空变化特征[J].水土保持学报,2005,19(4):89-94.
XIAO Peng-fei, ZHANG Shi-rong, HUANG Li-qin, et al. Temporal-spatial variability of soil available phosphorus in Chengdu Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):89-94.
- [29] 齐峰,王学军.环境空间分析中常用采样方法及其对空间结构表达的影响[J].环境科学学报,2000,20(2):207-212.
QI Feng, WANG Xue-jun. Sampling methods in environmental spatial analysis and their effects on spatial continuity display[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(2):207-212.
- [30] 黄治平,徐斌.规模化猪场废水污灌农田的土壤Zn和Cu空间变异分析[J].农业环境科学学报,2008,27(1):126-132.
HUANG Zhi-ping, XU Bin. Spatial variability of zinc and copper in farmland soil irrigated with swine wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):126-132.
- [31] 王学军,席爽.北京东郊污灌土壤重金属含量的克立格插值及重金属污染评价[J].中国环境科学,1997,17(3):225-228.
WANG Xue-jun, XI Shuang. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing City[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(3):225-228.
- [32] 孟涛,周非,聂庆华,等.污灌条件下农田土壤重金属的空间变异与模拟[J].农业环境科学学报,2008,27(3):867-872.
MENG Tao, ZHOU Fei, NIE Qing-hua, et al. Spatial variation of heavy metal contents in farmland soils under permanent irrigation from polluted river water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):867-872.
- [33] 王学军,邓宝山,张泽浦.北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[J].环境科学学报,1997,17(4):412-416.
WANG Xue-jun, DENG Bao-shan, ZHANG Ze-pu. Spatial structures of trace element contents in sewage irrigated soil at the eastern suburb of Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(4):412-416.
- [34] 乌鲁木齐市统计局.乌鲁木齐统计年鉴2005[M].北京:中国统计出版社,2005.
Urumqi Municipal Bureau of Statistics. Urumqi Statistical Yearbook-2005[M]. Beijing:China Statistics Press, 2005.
- [35] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS Geostatistical Analyst[M]. USA:ESRI. 2001. 19-203.
- [36] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central low soils[J]. *Soil Sci Soc Am*, 1994, 58:1501-1511.
- [37] Sadler E J, Bauer P J, Busscher W J, et al. Site-specific analysis of a droughted corn crop: II. Water use and stress[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(3):403-409.
- [38] Sadler E J, Busscher W J, Bauer P M, et al. Spatial scale requirement for precision farming: a case study in the southeastern USA[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 90(2):191-193.
- [39] Alexandra N K, Donald G B. Correlation of corn and soybean yield with topography and soil properties[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(1):75-83.
- [40] 刘付程,史学正,王洪杰,等.苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系[J].土壤,2003,35(4):330-333.
LIU Fu-cheng, SHI Xue-zheng, WANG Hong-jie, et al. Spatial distribution of soil Zn and relationship between soil Zn and soil particle composition in typical area of southern Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2003, 35(4):330-333.
- [41] 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室.新疆土壤[M].北京:科学出版社,1996.
Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Soil Survey Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region. The Soil of Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [42] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992.
- [43] 沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998.
SHEN Shan-min. Soil fertility of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.