

黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征*

魏孝荣^{1,2} 邵明安^{1,2*}

(¹西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 通过野外调查采样和室内分析,研究了黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)和有机质的分布特征及其与土地利用方式、地形条件和土壤类型的关系.结果表明:黄土高原小流域土壤 pH、CEC和有机质分别介于 7.7~8.6、11.9~28.7 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 3.0~27.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别服从正态分布、对数正态分布和负二项分布.3种土壤性质随地形、土地利用方式和土壤类型的不同差异很大.不同土地利用方式下,土壤有机质和 CEC以林地、草地和农田较高,果园较低;pH则以林地较低,其他利用方式较高;不同地形条件下,3种土壤性质均呈塬面和坡地大于沟道和梯田的趋势;不同类型土壤中,有机质和 CEC以黑垆土和红土较高,pH则以黄绵土较高.整体上,土壤有机质和 CEC呈现出相似的变化趋势,而 pH的分布特征则与之相反.

关键词 小流域 pH 阳离子交换量 有机质 土地利用 地形 土壤类型

文章编号 1001-9332(2009)11-2710-06 **中图分类号** S153 **文献标识码** A

Distribution characteristics of soil pH, CEC and organic matter in a small watershed of the Loess Plateau WEI Xiao-rong^{1,2}, SHAO Ming-an^{1,2} (¹Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -*Chin J. Appl Ecol*, 2009, 20(11): 2710-2715.

Abstract: Soil chemical properties play important roles in soil ecological functioning. In this study, 207 surface soil (0-20 cm) samples were collected from different representative landscape units in a gully watershed of the Loess Plateau to examine the distribution characteristics of soil pH, cation exchange capacity (CEC) and organic matter, and their relations to land use type, landform, and soil type. The soil pH, CEC and organic matter content ranged from 7.7 to 8.6, 11.9 to 28.7 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 3.0 to 27.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and followed normal distribution, log-normal distribution, and negative binomial distribution, respectively. These three properties were significantly affected by land use type, landform, and soil type. Soil CEC and organic matter content were higher in forestland, grassland and farmland than in orchard land, and soil pH was lower in forestland than in other three land use types. Soil pH, CEC and organic matter content were higher in plateau land and sloping land than in gully bottom and terrace land. Soil CEC and organic matter content were higher in dark brown soil and red soil, while soil pH was higher in yellow brown soil. Across all the three landscape factors, soil CEC and organic matter content showed the similar distribution pattern, but an opposite distribution pattern was observed for soil pH.

Key words: small watershed; pH; CEC; organic matter; land use; landform; soil type

*国家重点基础研究发展计划项目(2007CB106803)、国家自然科学基金项目(40801111)和中国科学院西部之光西部博士项目资助。

**通讯作者. E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

2009-01-19收稿, 2009-09-01接受。

pH、阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC)和有机质是土壤最基本的理化性质,影响着土壤中许多化学反应和化学过程,从而影响植物和微生物所需养分的有效性,支配着化学物质在土壤中的行为,在土壤生态系统物质循环、能量流动、土壤质量及生产力的维持和保育以及土地资源持续利用方面具有重要作用^[1-2]。在土壤 pH、CEC和有机质分布方面,许多学者分析了土地利用方式^[3-9]、地形条件^[10-14]、土壤类型^[15-17]的影响,建立了相应的关系,对土壤资源的合理管理和有效利用有一定的指导作用。但这些研究往往只关注某一类因子的影响,没有综合多种因素共存条件下这些性质的分布特征,从而使研究成果在地理单元复杂地区的应用受到限制。

土壤基本理化性质的分布及与之有关的土壤质量变化不仅关系到粮食生产和生态环境的持续发展,而且影响着某一区域在全国生态环境战略布局中的地位^[18]。黄土高原地区地形复杂,土地利用方式多变,土壤类型多样,这使影响该区土壤性质分布的因子复杂多变,因此,需要综合考虑在一个独立流域单元内影响土壤性质空间分布的各个因子,并将其影响叠加到该地理单元土壤性质的分布格局中,才能有效揭示土壤性质的分布特征。本文分析了黄土高原典型小流域土壤最基本的理化性质 pH、CEC和有机质的整体分布及其与地形条件、土地利用方式和土壤类型的关系,旨在为深入研究黄土高原地区土壤性质的空间分布特征提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在地处黄土高原南部的王东沟小流域进行。该小流域位于陕西省长武县境内(35°12'—35°16' N, 107°40'30"—107°42'30" E),海拔 800~1200 m,属典型的黄土高原沟壑区,流域总面积 8.3 km²。该流域气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温 9.1℃,多年平均无霜期 171 d, 0℃活动积温 3866℃, 10℃活动积温 3029℃,多年平均降雨量 584.1 mm,降水变率大,年内季节分布不均,主要集中在 7—9月。研究区地形条件主要有塬面、坡地、沟道和梯田,所占比例分别为 35%、34%、9%和 22%;土地利用方式有林地、草地、农田和果园,所占比例分别为 46%、15%、32%和 7%;土壤类型主要有黑垆土、黄绵土和红土,分别占流域面积的 42%、38%和 20%。

1.2 样品采集与分析

以比例尺为 1:7500的王东沟小流域地图为工作底图,于 2005年 7月采集小流域不同地形条件、不同土地利用方式和不同土壤类型条件下表层(0~20 cm)土壤样品 207个,土壤样本数在不同地形条件下的分布为:塬面 55个、坡地 47个、沟道 59个、梯田 48个;在不同土地利用方式下的分布为:林地 61个、草地 71个、农田 13个、果园 62个;在不同土壤类型下的分布为:黑垆土 73个、黄绵土 90个、红土 44个。采样时考虑到样品的地块代表性,同一地块随机采取 5个点组成混合土样。将土壤样品风干供分析测定。本研究的样点布设情况如图 1所示。土壤 pH、CEC和有机质用常规方法测定^[19]。

1.3 数据处理

采用 SAS 8.0软件进行数据分布类型检验、方差分析和相关分析,采用 Origin 7.5软件绘图。

2 结果与分析

2.1 小流域土壤性质的总体特征

在一个完整的小流域内,由于成土母质分布、土壤发育程度、地形变异及由此造成的土壤水、热分布的差异^[2],再加上土地利用、土壤侵蚀、植被类型等因素的影响,土壤 pH、CEC和有机质差异很大(表 1)。在 3种土壤性质中,土壤 pH变异最小,其变异系数仅为 1.6%;有机质变异最大,变异系数为 31.8%;阳离子交换量的变异系数介于二者之间。这些土壤性质在小流域范围内的变化状况除与环境因素的影响有关外,还与它们在土壤中的特性有关。

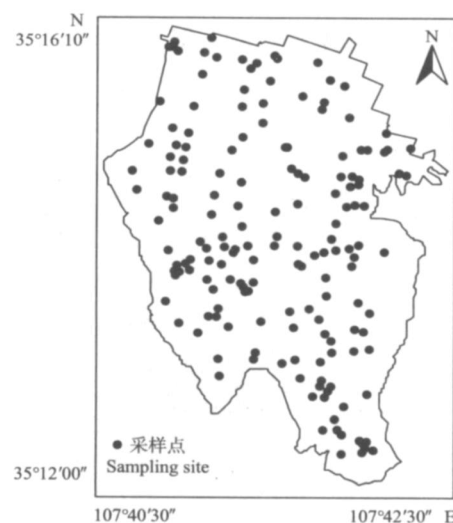


图 1 王东沟小流域土壤样点分布

Fig 1 Distribution of soil sampling sites in the Wangdonggou watershed

表 1 小流域土壤 pH、CEC 和有机质分布状况
Tab 1 Distribution status of soil pH, CEC and organic matter in the small watershed

	pH	CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
平均值 Average	8.2	18.0	12.0
最大值 Maximum	8.6	28.7	27.9
最小值 Minimum	7.7	11.9	3.0
标准差 SD	0.1	3.2	3.8
CV (%)	1.6	17.5	31.8

土壤 pH 是衡量土壤酸碱性的指标,自然条件下土壤的酸碱性主要取决于土壤盐基状况,而土壤盐基状况又取决于淋溶过程和复盐基过程的强弱^[20].在研究区多年平均降雨量为 584.1 mm 的情况下,土壤淋溶过程和复盐基过程较弱,短期内对土壤 pH 影响不大,所以土壤 pH 实际上由成土母质和生物过程控制.成土母质和生物过程在所研究区域的变异较小,因此,土壤 pH 值的变化也不大,其变化范围为 7.7~8.6.

土壤阳离子交换量是土壤吸附和交换的阳离子容量,其大小与土壤胶体种类和含量有关^[1,20],因此取决于土壤矿物种类、有机质含量等基本性质.所研究的小流域土壤阳离子交换量在 11.9~28.7 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数也较小(17.5%).

土壤有机质处于不断分解和形成过程中,其含量主要受气候条件、植被类型、成土母质、土壤环境及人为活动的影响,表现出一定的变异性^[1,21].本研究中表层土壤有机质含量变幅为 24.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异较大.

土壤性质的频率分布特征不仅反映了它们在土壤中分布的总貌,而且在某种程度上包含了与表层环境中地球化学过程有关的信息^[22].统计表明,研究区土壤 pH 服从正态分布,阳离子交换量服从对数正态分布,有机质服从负二项分布.许多学者发现有机质一般服从正态分布或对数正态分布^[23-27],本研究有机质的频率分布特征与其他研究结果不尽一致,这可能是因为他们们的研究区域自然环境条件较

为均一,而本研究区域地形条件、土地利用方式和土壤类型较为复杂.表明自然环境的巨大差异也可造成土壤性质在频率分布上的分异.因此,本文着重分析了不同环境条件下 3 种土壤性质的分布特征.

2.2 不同环境条件下土壤性质的分布特征

2.2.1 不同土地利用方式下土壤性质的分布特征

土地利用方式作为人类利用土地各种活动的综合反映,其变化不仅可以改变土地覆被状况,如使地表植被种类发生变化,影响植物凋落物的归还量等,还会引起土壤管理措施的改变,从而导致土壤性质的变化^[22].方差分析结果表明,不同土地利用方式下 3 种土壤性质的差异均达到极显著水平($P < 0.01$,表 2).

土壤有机质含量在林地、草地和农田中含量较高,果园较低(图 2).农田和果园土壤有机质的差异与肥料投入紧密相关,所研究小流域每年施入农田的有机肥料量是施入果园的 7 倍(农田 7510 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占肥料总量的 87.8%;果园 1043 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,占肥料总量的 12.2%),而且农田有作物根系和残茬存留,这又增加了土壤有机物料的投入.果园土壤除有机肥外几乎没有其他有机物料的输入,其土壤有机质水平较低,只有农田土壤的 86%.林地和草地没有肥料施用,但有大量的植物残体归还到土壤中,从而增加了土壤的有机质含量.

林地土壤 pH 值显著低于其他 3 种土地利用方式,分别比草地、农田和果园低 0.11、0.14 和 0.10(图 2).这是因为林地土壤表层聚集了大量的枯枝落叶,枯枝落叶在微生物的作用下发生分解,此过程向表层土壤释放各种有机酸,显著降低了表层土壤的 pH 值^[28].另外,林地土壤腐殖质含量高,其中的腐殖酸等也能使土壤 pH 值有较大幅度的降低^[29],pH 与有机质之间呈极显著的负相关关系($r = -0.265$, $P < 0.001$)就说明了这一点.林地土壤 pH 的降低对其他土壤性质的分布及养分的有效性有重要影响.

不同土地利用方式下土壤 CEC 的变化趋势与

表 2 不同环境条件下土壤 pH、CEC 和有机质的方差分析

Tab 2 Variance analysis of soil pH, CEC and organic matter among different environmental factors

项目 Item	土地利用方式 Land use type			地形条件 Landform			土壤类型 Soil type		
	pH	CEC	OM	pH	CEC	OM	pH	CEC	OM
平方和 SS	0.5	573.8	431.8	2.6	286.5	452.7	0.4	188.7	93.8
均方 MS	0.2	191.3	143.9	0.9	95.5	150.9	0.2	94.4	46.9
F	12.5	26.5	11.4	2.7	9.8	11.6	13.3	10.4	3.3
P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0480	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0400

OM: 有机质 Organic matter

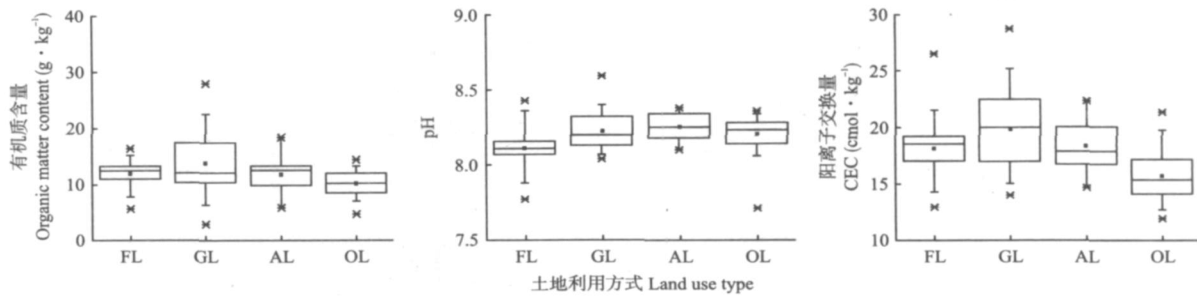


图 2 不同土地利用方式下土壤性质的分布

Fig 2 Distribution of soil properties under different land use types

FL:林地 Forest land; GL:草地 Grassland; AL:农田 Farm land; OL:果园 Orchard

有机质的变化趋势相似,为草地 >林地 >农田 >果园(图 2),这是因为土壤有机质中的有机胶体为两性胶体,是土壤固相中阳离子交换量最大的部分,随着有机质含量的增加,CEC 也增加^[1]。本研究中 CEC 与有机质呈极显著正相关关系 ($r=0.495, P < 0.01$),所以 CEC 呈现出与有机质相同的分布趋势。

2.2.2 不同地形条件下土壤性质的分布特征 地形条件支配着水、热资源的分配及再分布,影响着土壤的发育程度。水、热资源的分配直接影响土壤中有有机物质的矿化和腐殖化过程,从而支配着不同地形条件下主要土壤性质的分布。不同地形条件下土壤 pH 值差异显著,CEC 和有机质差异极显著 ($P < 0.01$) (表 2)。

本研究中塬面和坡地 3 种土壤性质的值均高于沟道和梯田土壤(图 3),这主要与以下几方面因素有关。一是不同地形条件下土地利用方式不同,塬面主要为农田和果园,有有机肥料投入,其土壤有机质含量较高;梯田开垦后土壤养分贫瘠,而且梯田离居住地较远,只施用氮、磷化肥而未施用有机肥料,土壤有机质含量最低。二是不同地形条件下,光、热、水资源的分配不同,坡地的光、热资源均优于塬面^[30],因此土壤中有有机质的矿化作用也强于塬面土壤,造

成其土壤有机质含量降低。由于有机质与 pH 和 CEC 之间呈极显著相关,因此,不同地形条件下 pH 和 CEC 的分布趋势与有机质相似。

2.2.3 不同类型土壤性质的分布特征 土壤类型不同,其成土母质、成土过程、土壤理化性质等不同,生长在其上的植被类型及植物对土壤性质的影响也不同。研究区 3 种类型土壤的理化性质表现出显著差异(表 2)。土壤 pH 值以黑垆土最低,黄绵土最高(图 4);黑垆土和红土的 pH 变幅较小(0.59 和 0.51),黄绵土的 pH 变幅较大(0.87)。不同类型土壤的 pH 与土壤的发育过程紧密相关,与黄绵土和红土相比,黑垆土成土过程中有着明显的腐殖质累积和石灰淋溶过程,这使其土壤 pH 较低;红土由于主要分布于沟道,土壤水分条件较好,而且其植被多为林草,土壤有机物质较多,红土发育过程也伴随有腐殖质累积和石灰淋溶过程,其 pH 也较低。土壤有机质含量以分布于林地和草地下的红土及塬面的黑垆土较高,黄绵土较低。不同类型土壤的阳离子交换量也呈现出与有机质相似的分布趋势。土壤有机质和阳离子交换量的变幅都以红土和黄绵土较大,分别为 24.9、15.1 g · kg⁻¹ 和 15.8、14.7 cmol · kg⁻¹,黑垆土较小,为 10.8 g · kg⁻¹ 和 8.4 cmol · kg⁻¹。

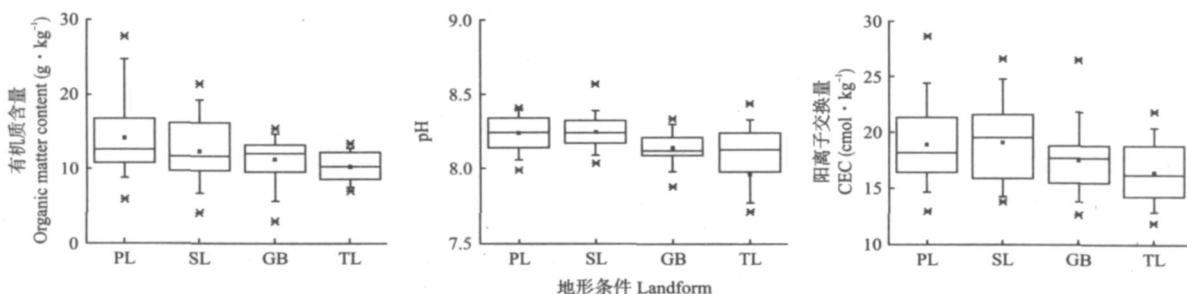


图 3 不同地形条件下土壤性质的分布

Fig 3 Distribution of soil properties under different landforms

PL:塬面 Plateau land; SL:坡地 Sloping land; GB:沟道 Gully bottom; TL:梯田 Terrace land

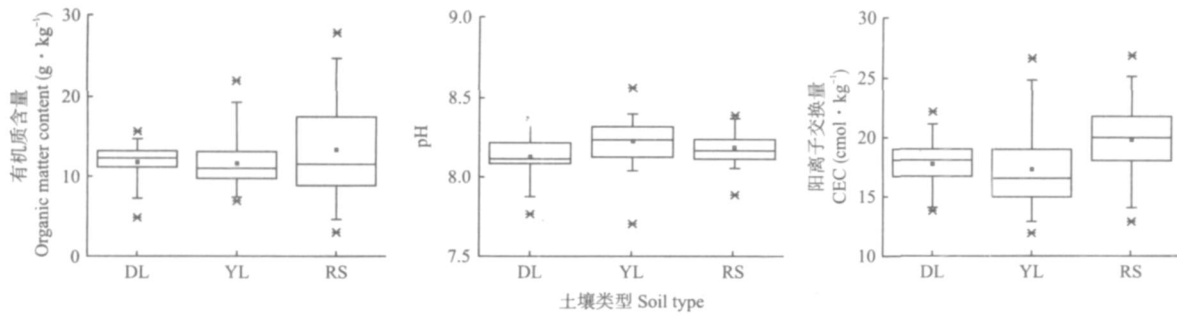


图 4 不同类型土壤性质的分布

Fig 4 Distribution of soil properties of different soil types

DL:黑垆土 Dark Loessial soil; YL:黄绵土 Yellow Loessial soil; RS:红土 Reddish soil

3 讨 论

本研究结果表明,在小流域范围内,土壤 pH、CEC和有机质随土地利用方式、地形和土壤类型的不同差异很大.不同土地利用方式下,输入到土壤中的有机物料种类和数量也不同,这些有机物料在土壤中的转化不但会影响有机质的分布,而且会改变与之有关的土壤过程,对 pH和 CEC产生影响^[6-8].此外,人为活动的干扰,特别是农田和果园的耕作和施肥,也是引起不同土地利用方式下土壤性质差异的主要原因^[3].不同地形条件下,土壤水、热过程差异很大^[10,12],而水、热过程又改变了土壤的物质循环,如有机质的累积和分解、土壤物质淋溶等,从而对土壤基本性质产生影响^[13].不同类型土壤的成土母质各不相同,成土过程也存在差异,因此,土壤基本性质也表现出显著差异^[15-16].可见,在小流域范围内,不同土地利用方式下生物循环和人为干扰、不同地形条件下土壤水热运行及不同类型土壤的成土母质和成土过程相互作用,共同影响着土壤性质的分布特征.

在本研究中,各环境因子相互交叉,如塬面分布的农田和黑垆土较多,坡地分布的草地和黄绵土较多,而沟道分布的林地、草地和红土较多.不同土地利用方式下土壤有机质和 CEC以林地、草地和农田较高,果园较低;pH以林地较低,其他利用方式较高;不同地形条件下 3种土壤性质均呈现塬面和坡地 >沟道和梯田的趋势;不同类型土壤中,有机质和 CEC以黑垆土和红土较高,pH以黄绵土较高.总体上,有机质和 CEC呈现出相似的变化趋势,pH的分布特征与之相反.表明不同环境因子的相互重叠并没有使土壤性质的分布呈现出相似的重叠趋势,反而使土壤性质的分布特征变得更为复杂,这可能与土地利用方式、地形条件和土壤类型对土壤性质的

影响在这些因子相互作用过程中发生变化以及各土壤性质之间的内在联系有关.因此,在土壤性质分布研究中,特别是在环境因子复杂多变的黄土高原地区,还需要发展新的研究方法,深入分析土壤性质在土地利用方式、地形条件和土壤类型等多环境因子共同存在条件下的分布特征,为大尺度空间上土壤性质的准确预测及实际应用提供更为准确的依据和手段.

参考文献

- [1] Li X-Y (李学垣). Soil Chemistry. Beijing: Higher Education Press, 2001 (in Chinese)
- [2] Xiong Y (熊毅), Li Q-K (李庆逵). Chinese Soils. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese)
- [3] Zhang X-Y (张心昱), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), et al. Effects of land use and management practice on farm land soil quality in Yanhuai basin of Beijing. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(2): 303-309 (in Chinese)
- [4] Wu W-B (吴文斌), Yang P (杨鹏), Tang H-J (唐华俊), et al. Regional variability of effects of land use system on soil properties. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2007, **40**(8): 1697-1702 (in Chinese)
- [5] Sheng X-B (盛学斌), Liu Y-X (刘云霞), Sun J-Z (孙建中). Effect of land-use change on soil habitat in north Hebei plateau during last 50 years. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(4): 589-592 (in Chinese)
- [6] Gong J (巩杰), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(12): 2292-2296 (in Chinese)
- [7] Latty EF, Canham CD, Marks PL. The effects of land-use history on soil properties and nutrient dynamics in northern hardwood forests of the Adirondack Mountains. *Ecosystems*, 2004, **7**: 193-207
- [8] Luo GP, Chen X, Xu WQ. Soil properties related to land-use systems in oases of Sangong River watershed,

- Xinjiang *Journal of Geographical Sciences*, 2008, **18**: 483-498
- [9] Jiang YI. The impact of land use on soil properties in a Karst agricultural region of Southwest China: A case study of Xiaojiang watershed, Yunnan *Journal of Geographical Sciences*, 2006, **16**: 69-77
- [10] Mon taz HR, Jafarzadeh AA, Torabi H, *et al* An assessment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran *Geodema*, 2009, **149**: 10-18
- [11] Lark RM. Soil-landform relationships at within-field scales: An investigation using continuous classification. *Geodema*, 1999, **92**: 141-165
- [12] Nagamatsu D, Yoshihiko H, Mochida Y. Influence of micro-landforms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest *Ecological Research*, 2003, **18**: 533-547
- [13] Zhang X-L (张学雷), Chen J (陈杰), Zhang G-L (张甘霖). Landform based pedodiversity of some soil chemical properties in Hainan Island, China *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15** (8): 1368-1372 (in Chinese)
- [14] Liu Y-L (柳云龙), Hu H-T (胡宏涛). Effect of landscape and soil utilization styles on red soil physical properties *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2004, **18** (1): 22-26 (in Chinese)
- [15] Koutika LS, Meuteum Kanga JG. Soil properties under *Chromolaena odorata* fallow on two soil types (southern Cameroon). *Geodema*, 2006, **132**: 490-493
- [16] Ma L-Y (马履一), Zhai M-P (翟明普), Lin P (林平). Analysis of soil physico-chemical properties of Beijing Xishan Mountain *Journal of Beijing Forestry University (北京林业大学学报)*, 1999, **21** (1): 32-37 (in Chinese)
- [17] Girvan MS, Bullimore J, Pretty JN, *et al* Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**: 1800-1809
- [18] Ma B-H (马博虎), Liu Y (刘毅), Li S-Q (李世清), *et al* Effect of eco-system environment rebuild in the Loess Plateau on soil quality *Ecological Economy (生态经济)*, 2007 (3): 39-46 (in Chinese)
- [19] Page AL, Miller RH, Kenney DR. Methods of Soil Analysis Part 2 (Agronomy Monographs 9). Madison: American Society of Agronomy, 1982
- [20] Huang C-Y (黄昌勇). Soil Science Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Yu G-R (于贵瑞). Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: China Meteorological Press, 2003 (in Chinese)
- [22] Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), Qiu Y (邱扬), *et al* Land Use Structure and Ecological Process in the Hilly Area of the Loess Plateau Beijing: Commercial Press, 2002 (in Chinese)
- [23] Lin X (蔺昕), Li X-J (李晓军), Sun T-H (孙铁珩), *et al* Spatial distribution of soil organic matter in Shen-Fu oil-sewage irrigation area *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2008, **27** (4): 569-572 (in Chinese)
- [24] Liu Z-K (刘忠宽), Wang S-P (汪诗平), Han J-G (韩建国), *et al* Changes of soil chemical properties in sheep urine patches in Inner Mongolia steppe *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15** (12): 2255-2260 (in Chinese)
- [25] Yuan X-Y (苑小勇), Huang Y-F (黄元仿), Gao R-T (高如泰), *et al* Spatial variability characteristics of farmland soil organic matter in Pinggu District, Beijing, China *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2008, **24** (2): 70-76 (in Chinese)
- [26] Hu K-L (胡克林), Yu Y (余艳), Zhang F-R (张凤荣), *et al* The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2006, **39** (4): 764-771 (in Chinese)
- [27] Zhang W (张伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al* Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2007, **27** (12): 5168-5175 (in Chinese)
- [28] Cui G-F (崔国发), Cai T-J (蔡体久), Yang W-H (杨文化). Soil acidity of *Larix gmelini* plantation *Journal of Beijing Forestry University (北京林业大学学报)*, 2000, **22** (3): 33-36 (in Chinese)
- [29] Chen L-X (陈立新), Yang C-D (杨承栋). Component of soil humic substances in larch plantations and its effects on soil acidity. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2007, **43** (2): 8-14 (in Chinese)
- [30] Hao M-D (郝明德), Liang Y-L (梁银丽). Structure, Function, and Adjusting Mechanism and Technique of Changwu Agricultural Ecosystem. Beijing: China Meteorological Press, 1998 (in Chinese)

作者简介 魏孝荣,男,1978年生,博士,助理研究员。主要从事土壤生态学研究,发表论文 20 余篇。E-mail: xtwei78@163.com

责任编辑 张凤丽
