

江汉平原不同土地利用方式下农田土壤有机碳组成特点

汪明霞¹, 朱志锋¹, 刘凡¹, 谭文峰^{1,2}

(1. 农业部 长江中下游耕地保育重点实验室, 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070;

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:以江汉平原四湖地区的果园、旱地、水田和水旱轮作等土壤为研究对象,通过分析其总有机碳与活性有机碳含量、腐殖质与轻重组组成特点,以期阐明不同土地利用方式对农田土壤有机碳组成的影响。结果表明:不同利用方式下表层土壤有机碳含量差异较大,其中以水田最高、果园最小,随着土壤剖面深度的增加,有机碳含量逐步降低;腐殖质占总有机碳比例较高,其中果园和旱地大于 0.91,水旱轮作略低,而水田仅为 0.78;不同利用方式下,各形态的腐殖质碳含量存在差异,活性较高的富里酸在水田和水旱轮作土壤中含量相对较高;稳定性有机碳占总有机碳的百分比大小顺序为:水旱轮作 \approx 旱地 $>$ 果园 $>$ 水田,轻组组分在各利用方式下表现为:水田 $>$ 旱地 $>$ 果园 $>$ 水旱轮作,而水旱轮作下重组碳容量占总有机碳的百分比最高。这表明水旱轮作既有利于土壤有机碳的积累,又利于土壤有机碳稳定性的增加。上述结果可为该区土壤管理措施的制订提供科学参考。

关键词:土壤; 活性有机碳; 稳定性有机碳; 土地利用; 江汉平原

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0024-05

Composition Characteristics of Soil Organic Carbon under Land Use Change in Jiangnan Plain, Hubei Province

WANG Ming-xia¹, ZHU Zhi-feng¹, LIU Fan¹, TAN Wen-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtse River, Ministry of

Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil samples in orchard, dryland, paddy, and the field with dryland and paddy rotation were collected from Houhu state farm of Qianjiang City, Hubei Province, where is the centre of Jiangnan plain. The total and active organic carbon, composition of humus, and light and heavy fractions were measured. The contents of organic carbon (OC) in topsoil were different under land use changes. The OC content for paddy soil was the highest and that for orchard soil was the lowest. The ratios of OC in humus to total SOC for orchard, dryland, paddy, and rotation soil were 0.98, 0.91, 0.78 and 0.86, respectively. The contents of OC in fulvic acid for paddy and rotation soils were higher than those in other soils. The proportion of stable organic carbon in total SOC was in the order of rotation \approx dryland $>$ orchard $>$ paddy, and the light fraction followed the sequence of paddy $>$ dryland $>$ orchard $>$ rotation. It was suggested that the SOC content would be increased under water culture. However, the SOC stability decreased under water culture, and it would lost easily when the environment changed. Rotation soil should be paid attention, which was both high in total and stable OC content. It indicates that rotation culture will not only increase SOC content, but also increase SOC stability. These results will be helpful to provide scientific references to develop rational ways of soil management and cultivation.

Key words: soil; active organic carbon; stable organic carbon; land use; Jiangnan Plain

收稿日期:2012-05-03

修回日期:2012-07-11

资助项目:国家自然科学基金项目(40971144, 41201231)

作者简介:汪明霞(1975—),女,湖北咸宁人,博士,讲师,主要从事土壤化学与环境模拟方面的研究。E-mail:wangmx@mail.hzau.edu.cn

通信作者:谭文峰(1971—),男(土家族),湖北巴东人,博士,教授,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:wenfeng.tan@hotmail.com

土壤有机碳不仅是土壤质量的核心,还是土壤圈调节大气 CO₂ 浓度的主要媒介,其变化将影响大气 CO₂ 浓度,是大气碳素的重要源或汇^[1-4]。京都协议中将土壤固碳作为缓解温室效应的可选方案之一^[5]。人类活动引起的土地利用变化是影响土壤碳循环和碳库的最直接因素。与植物生长相比,土壤中 94%~98% 的有机碳含量都是因土地利用方式的变化而引起的^[6]。目前,有关土地利用变化对土壤有机碳影响的研究已有较多报道,主要集中在:(1) 自然土壤变成耕地土壤、天然林变成农田、农田变成草地或草地变成农田等变化对土壤有机碳含量的影响,以及不同利用方式间土壤有机碳含量的比较^[7-10];(2) 不同农业管理措施(包括少耕、免耕、覆盖、合理轮作、施肥条件等)对土壤有机碳动态变化的影响^[11-12];(3) 不同利用方式下,土壤有机碳密度和贮量的变化特点^[13-17]。但直接涉及农田土壤不同利用方式下有机碳组成特点、活性有机碳变化及其碳汇效应的报道并不多见,而这些问题可能涉及到因土地利用变化引起的土壤有机碳积累或损失的机制、以及影响因素等。

土壤有机碳可分为易分解的活性有机碳和不易分解的稳定性有机碳(含植物有机质和被黏粒保护的腐殖质)^[18]。在土地利用变化过程中,响应最快的应是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有直接作用的那部分易分解有机碳,其含量的高低明显影响植物对土壤养分的吸收利用;同时,由于它活跃的性质和重要作用,土壤活性有机碳组分对土地利用变化的响应,已成为当前土壤碳库和养分循环领域研究的热点^[7,19]。也有学者根据密度的差异和在水中溶解性的不同,将土壤有机碳分为轻组(light fraction)和重组(heavy fraction)两部分;轻组部分的有机碳主要是游离态的有机碳,与黏土矿物结合不强烈,缺乏土壤胶体的保护,随着耕作制度或管理措施的改变,此部分有机碳容易损失,它对土地利用方式较为敏感;重组部分的有机碳与黏土矿物结合紧密,形成有机无机复合体,起到有效的保护作用^[20-21]。因此,明确土壤有机碳不同组分的特点,将有助于阐明有机碳积累或损失的机制。本文在已明确江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累的基础上^[22],深入分析果园、旱地、水田和水旱轮作下土壤有机碳的活性与稳定性、轻重组组成特点,以阐明土地利用方式对土壤有机碳性质的影响,为提高土壤肥力、指导农业生产、制定环境产业政策等提供重要数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江汉平原后湖农场。该农场地处江汉平原四湖水网湖区,北依汉水、南近长江,面积 72 km²。全农场地貌悬殊不大,平坦连片,海拔高度 27.5~30 m,坡度一般小于 1‰。地下水位季节性升降,秋冬 1~2 m,夏季 1 m 以内,氧化还原频繁,水质良好,属重碳酸盐型。该区域年均气温 16.3℃,≥10℃ 积温 5 222℃,年降雨量 1 450~1 500 mm,为湿热土壤水热状况,具有一年三熟的气候条件。土壤由长江和汉江的近代沉积物构成,土层深厚肥沃,质地为黏土和黏壤土,排灌条件较好。母质均为 Q4 石灰性河流冲积物,其黏土矿物组成较为一致:以水云母为主,其次为高岭石和 1.4 nm 矿物,还含有少量的蒙脱石。该区主要采用无壁犁机械化耕作,耕作过程中表层土壤只有部分翻转。

1.2 样品采集

采样区土壤在 20 世纪 50s—60s 进行过土地平整,前期的土壤条件较为一致。本实验在选定的每一种利用类型(果园、旱地、水田、水旱轮作)样地田块上,随机选择 2~3 个具有代表性的样点,共采集 10 个剖面,不同利用类型土壤剖面相距 200~500 m。根据土壤发生层特点,每个剖面采集 1~6 土样,重复采样 3 次,表层厚度主要分布于 0~16 cm,采样点基本情况见表 1。土样采好后,自然风干,分别过 0.25、0.045 mm 筛于干燥器中备用。

表 1 采样点基本情况

样点	纬度	经度	利用状况	表层土壤 pH 值	土壤系统 分类
果园	30°23′13.5″	112°44′14.7″	13~14 a 果园,种植桃树,树高 2~3 m,林下灌丛生长茂盛,植被覆盖较好	8.25	潮湿雏形土
旱地	30°23′2.1″	112°41′34.2″	10 a 夏棉冬麦老旱地	7.23	潮湿雏形土
水田	30°20′51.8″	112°40′40.4″	10 a 以上,只种一季中稻的冬闲老水田	7.14	水耕人为土
水旱轮作	30°23′7.5″	112°42′18.0″	20 a 夏棉冬麦—夏稻冬麦水旱轮作	7.40	水耕人为土

1.3 样品测定与分析

土壤有机碳含量测定用重铬酸钾外加热法^[23];土壤腐殖质组成用焦磷酸钠与氢氧化钠混合液提

取^[24];土壤 pH 值(水土比例 2.5:1)采用奥立龙酸度计(型号 410)测定。土壤轻重组的分离:称取通过 0.25 mm 筛风干土样 5.00 g,置于已称重的 100 ml

离心管中,加入密度为 1.8 的溴仿—乙醇混合重液,于 21.5 kHz、300 mA 超声分散 10 min,然后以 3 000 rpm 离心 10 min。将悬浮有轻组有机碳的重液倒入铺有滤纸的玻璃漏斗中过滤。离心管中继续加入密度为 1.8 g/cm³ 的重液,重复上述过程 2~3 次至离心后重液中无轻组有机物为止。离心管中的重组用 95% 乙醇洗涤 3 次、再用去离子水洗涤 2 次后,将盛有重组的离心管于 40℃ 烘干、称重,采用差减法计算重组质量。根据全土有机碳含量、全土质量、重组有机碳含量、重组质量计算出轻组有机碳含量^[23]。

土壤活性有机碳的测定:称取约含 15 mg 有机碳的土样,置于 100 ml 塑料瓶中,加入 25 ml 333 mmol/L 的 KMnO₄ 溶液,25℃ 下震荡处理 1 h 后,离心 5 min (4 000 rpm),保留上清液,用去离子水按 1:250 稀释,然后用可见分光光度计(北京瑞利分析仪器公司, VIS—7220)在 565 nm 比色测定,由 KMnO₄ 浓度的变化计算出活性有机碳含量,再根据相应土壤有机碳的含量计算其分配比例(即活性有机碳与总有机碳含量的比值)^[25]。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤有机碳的含量

由土壤剖面有机碳分布曲线(图 1),不同土地利用方式下表层土壤有机碳含量差异较大,其中以水田最高(39.0 g/kg),其次为水旱轮作(20.8 g/kg)、旱地(19.4 g/kg),果园最小(仅为 14.7 g/kg)。有机碳在土壤表层的含量最高,有明显富集;随着土壤深度的增加,有机碳含量逐步降低;剖面 40—50 cm 处有机碳含量约为 6.0~28.4 g/kg,只有表层土壤的 27%~71%。水田的犁底层中有机碳积累较明显,比表层略有增加(40.6 g/kg);而水旱轮作方式中犁底层有机碳含量锐减(12.4 g/kg),仅为表层的 60%。

2.2 不同土地利用方式下土壤腐殖质含量及组成特点

土地利用方式不仅影响土壤有机碳含量,而且影响腐殖质碳的含量和组成。由表 2 可见,不同利用方式下土壤表层腐殖质碳含量约为 14.19~30.31 g/kg,其含量顺序为:水田>水旱轮作>旱地>果园,与土壤有机碳含量顺序基本一致。供试土壤的腐殖质碳占总有机碳的比例较高,其中果园和旱地大于 91%,水旱轮作略低,而水田仅为 78%。这说明水耕利用方式下非腐殖质部分明显增加,即含有较多的碳水化合物和含氮化合物,此部分在土壤中一般稳定性较差。不同利用方式下土壤腐殖质碳在组成上均为:胡敏素(HU—C)>胡敏酸(HA—C)>富里酸(FA—C)。其中 HU—C 含量高达 9.99~21.93 g/kg,占腐

殖质总碳的 69%~74%;HA—C 和 FA—C 含量分别为 2.62%~5.24 g/kg 和 1.31%~3.14 g/kg,两者之和只占腐殖质总碳的 26%~31%。不同利用方式下,各形态的腐殖质碳含量存在差异,活性较高的富里酸以水田和水旱轮作方式较高。这些数据表明,水耕条件下土壤有机碳中活性部分明显增加。

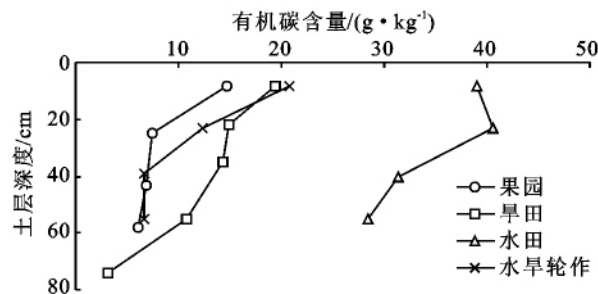


图 1 不同土地利用方式下土壤有机碳含量的剖面分布

表 2 不同土地利用方式表层土壤腐殖质碳含量

土地利 用方式	胡敏酸碳/ (g·kg ⁻¹)	富里酸碳/ (g·kg ⁻¹)	胡敏素碳/ (g·kg ⁻¹)	腐殖质碳/ (g·kg ⁻¹)	占土壤总有 机碳比例/%
果园	3.14a	1.31a	9.99a	14.44a	98
旱地	3.67b	1.31a	12.68b	17.66b	91
水田	5.24c	3.14b	21.93c	30.31c	78
水旱轮作	2.62d	2.36c	12.86b	17.84b	86

注:不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异性显著。

2.3 不同土地利用方式下土壤的活性、稳定性有机碳组成特点

4 种土地利用方式下表层土壤有机碳(SOC)、活性有机碳(ASOC)、稳定性有机碳(SSOC)含量、以及稳定性有机碳百分比见表 3。表 3 说明,SOC、ASOC 和 SSOC 含量均表现为:水田>水旱轮作>旱地>果园,而稳定性有机碳占土壤总有机碳的百分比表现为:旱地≈水旱轮作>果园>水田。尽管水田土壤中 SOC、ASOC、SSOC 含量均高于其它利用方式下的土壤,但其土壤稳定性有机碳比例为 68%,低于其它利用方式,说明水田耕作模式下土壤有机碳的稳定性相对较差,随着外界环境的改变,土壤中的有机碳可能更易降解和损失;而旱地和水旱轮作条件下,土壤稳定性有机碳占总有机碳比例较高,均为 73%。可见,水旱轮作下的土壤有机碳稳定性明显不同于完全水耕模式。

表 3 供试表层土壤活性有机碳、稳定性有机碳组成特点

土地利用 方式	有机碳含 量(SOC)/ (g·kg ⁻¹)	活性有机碳 含量(ASOC)/ (g·kg ⁻¹)	稳定性有机 碳(SSOC)/ (g·kg ⁻¹)	SSOC/ SOC 比例/%
果园	14.67a	4.42a	10.25a	70
旱地	19.43b	5.20b	14.23b	73
水田	39.03c	12.46c	26.57c	68
水旱轮作	20.75b	5.61b	15.14b	73

注:不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异性显著。

2.4 不同土地利用方式下土壤轻重组组成及其碳含量

表 4 为不同土地利用方式下表层土壤的轻重组组成。供试土壤轻组组分约占 4.9%~6.9%,重组组分约占 93.1%~95.1%,重组组分显著高于轻组组分,说明土壤中游离态或颗粒态有机碳较少,大部分有机碳是与土壤无机矿物结合在一起,形成有机无机复合体。土地利用方式对轻重组组分产生影响,轻组组分在各利用方式下表现为:水田>旱地>果园>水旱轮作;重组组分以水旱轮作方式最高(95.1%)、水田最低(93.1%)。

不同土地利用方式下轻组有机碳含量为 95.9~180.5 g/kg,重组有机碳含量为 10.2~28.6 g/kg,轻组有机碳含量明显高于重组有机碳含量(表 4)。轻重组有机碳含量在各土地利用方式下均表现为:水田>水旱轮作>旱地>果园,与总有机碳含量的顺序基本一致,而与轻组占总碳的比例顺序不同。在轻重组有机碳占总 SOC 的比例中,有 65.8%~72.9%的 SOC 分布在重组中,27.1%~34.2%的 SOC 分布在轻组中。重组中分布的 SOC 数量显著高于轻组,这表明重组 SOC 对总 SOC 的积累作用较大。而在重组有机碳容量占总碳百分比例中,水旱轮作>旱地≈水田>果园。已有研究表明^[20-21],土壤活性有机碳、轻组有机碳是植物重要的速效养分库,在实际表现中可指示土壤的肥力水平,对耕作、施肥等农业生产措

施的响应较快;同时,由于这部分有机碳与土壤呼吸速率、土壤矿化速率、微生物量氮等呈显著正相关,有较高的潜在生物活性,从而影响温室气体的排放。而重组中的有机碳与不同粒径的矿物颗粒结合紧密,主要吸附在矿物表面或隐蔽在土壤微团聚体内部,使其矿化速率减慢,在实际表现中可能反映了土壤固定稳定性有机碳的能力。尽管土地利用方式在由旱地向水田或水旱轮作转变过程中,使土壤有机碳的积累更为便利、土壤碳汇增加,但在水田利用方式下土壤活性碳、非腐殖质碳、轻组组分明显增加,从而导致土壤碳库容量也易发生变化。可见,水田条件下的土壤有机质对全球气候变化的贡献是双重的。李向阳等^[26]报道不同构型水稻土随潜育度的增加,表层土壤的有机质含量上升,土壤松结态、稳结态腐殖质中的胡敏酸、富里酸含量和紧结态腐殖质的含量也升高,而紧结态腐殖质在重组有机质中的比例下降。这些数据都表明不同土地利用方式对土壤固碳的影响可能主要是通过改变有机碳的形态来影响有机碳的稳定性,进而影响有机碳的分解率和农田土壤碳汇效应。但值得注意的是,水旱轮作方式下表层土壤的稳定性有机碳比例(73%)和重组有机碳容量占总有机碳的比例(72.9%)都是最高的,这暗示了在农业生产中,通过水旱轮作的方式既可增加有机碳的含量,又可增强有机碳的稳定性,但其机理还有待深入研究。

表 4 不同利用方式下表层土壤轻重组组成及其碳含量

土壤	果园			旱地			水田			水旱轮作		
	轻重组 比例/%	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	占总碳 比例/%	轻重组 比例/%	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	占总碳 比例/%	轻重组 比例/%	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	占总碳 比例/%	轻重组 比例/%	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	占总碳 比例/%
轻组	5.2	95.9	34.2	5.4	111.3	30.7	6.9	180.5	31.8	4.9	116.0	27.1
重组	94.8	10.2	65.8	94.6	14.2	69.3	93.1	28.6	68.2	95.1	15.9	72.9

注:占总碳比例是指轻组或重组比例与相应组分的碳含量的乘积占土壤总有机碳的百分比。

3 结 论

果园、旱地、水田和水旱轮作是江汉平原地区常见的土地利用方式。由本实验可知水田的土壤有机碳含量可达 39.0 g/kg,明显高于其它利用方式,表明此利用方式可显著提高土壤有机质的含量,有利于农田土壤固碳,增强土壤的生态效应。但水田利用方式下土壤的活性有机碳含量也较高(12.46 g/kg)、轻组组分比例(6.9%)较大,同时土壤腐殖质、稳定性有机碳比例较低,可通过水旱轮作的方式增加有机碳的含量和增强有机碳的稳定性。

参考文献:

[1] Trumbore S E, Chadwich O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon diox-

ide driven by temperature change[J]. Science,1996,272 (5260):393-396.

[2] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究,2009,16(2):30-33.

[3] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland [J]. Environmental Pollution,2002,116(3):353-362.

[4] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展,2005,20(4):384-392.

[5] United Nations. Report of the conference of the parties on its third session[R]. Kyoto Protocol, FCCC/CP/Add. United Nations,New York:1997.

[6] Caspersen J P, Pacala S W, Jenkins J C, et al. Contributions of land-use history to carbon accumulation in US forests[J]. Science,2000,290(5494):1148-1150.

[7] 王宪帅,黄从德,王勇军. 岷江上游山地森林—干旱河谷

- 交错带不同土地利用类型土壤有机碳储量[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 148-152.
- [8] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳储量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300-302.
- [9] 刘梦云, 安韶山, 常庆瑞. 宁南山区不同土地利用方式土壤有机碳特征研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 47-49.
- [10] 王百群, 姜峻, 都全胜, 等. 黄土丘陵区人工草地牧草营养元素累积土壤有机碳与养分特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 127-132.
- [11] 朱咏莉, 韩建刚, 吴金水. 农业管理措施对土壤有机碳动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 648-651.
- [12] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-19.
- [13] 张国盛, 黄高宝, Yin Chan. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 351-357.
- [14] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [15] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 351-360.
- [16] 张文菊, 吴金水, 童成立, 等. 三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 537-544.
- [17] Pan G X, Li L Q, Wu L, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2003, 10(1): 79-92.
- [18] Biedenbender S H, McClaran M P, Quade J, et al. Landscape patterns of vegetation change indicated by soil carbon isotope composition[J]. Geoderma, 2004, 119(1/2): 69-83.
- [19] Biederbeck B O. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(12): 1656-1674.
- [20] Motavalli P P, Palm C A, Parton W J, et al. Comparison of laboratory and modeling simulation methods for estimating carbon pools in tropical forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(8): 935-944.
- [21] Hassink J. Density fractions of soil macroorganic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(8): 1099-1108.
- [22] 谭文峰, 朱志峰, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973-980.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [24] 李学垣. 土壤化学及实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [25] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [26] 李向阳, 胡红青, 谭文峰, 等. 四湖地区不同水型水稻土的腐殖质分布特征[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(6): 631-634.

(上接第 23 页)

- [6] Jonathan H T, Robert S N, Stanley D S. Soil resources heterogeneity in the Mojave Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(3): 269-292.
- [7] 隋媛媛, 杜峰, 张兴昌. 黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 76-84.
- [8] 高艳霞, 徐东瑞. 石家庄市边缘带土壤养分空间分布特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1063-1069.
- [9] 马麟英. 不同土层土壤有机质含量对速效氮分配的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 193-196.
- [10] 杨奇勇, 杨劲松, 刘广明. 土壤速效养分空间变异的尺度效应[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 431-436.
- [11] 钱亦兵, 周华荣, 赵锐峰, 等. 塔里木河中下游湿地及其周边土壤理化性状的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 31-34.
- [12] 钱亦兵, 蒋进, 吴兆宁. 艾比湖地区土壤异质性及其对植物群落生态分布的影响[J]. 干旱区地理, 2003, 26(3): 217-222.
- [13] 文海燕, 赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 77-80.
- [14] 苏永红, 冯起, 刘蔚, 等. 额济纳三角洲土壤养分特征分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 134-138.
- [15] 闫培锋, 周华荣, 刘宏霞. 白杨河—艾里克湖湿地土壤理化性质的空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 406-412.
- [16] 胡江玲, 张高. 新疆精河流域土壤质量空间分异规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 116-118.