

盐分积累对设施土壤电化学性质和水稳性团聚体影响的模拟研究

操庆, 魏晓兰, 吴彩皎, 孙玮, 汤燕, 谷勋刚

(安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: [目的] 分析在盐分影响下土壤 pH 值和表面电荷量的变化趋势, 以及对土壤水稳性团聚体结构的影响, 为设施园艺及菜园土壤的改良提供参考。[方法] 以合肥市周边地区的黄褐土为研究对象, 研究盐分对土壤酸度、表面电荷以及水稳性团聚体含量的影响。试验设置了 4 个水平的盐分(0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%)处理和对照, 在 25 °C 恒温培养箱中进行了 60 d 的培养试验。分别在 10, 30 和 60 d 取样分析。[结果] 盐分浓度越高, 土壤 pH 值越低, 培养 60 d 后 1.2% 处理与 CK 相比土壤 pH 值下降 0.53; 随着盐分浓度的升高, 土壤的表面负电荷量呈递减趋势, 正电荷量则变化不明显; 模拟盐的增加能促进土壤中中小团聚体相互胶结, 从而促使水稳性大团聚体增多。[结论] 盐分能够使土壤 pH 值和表面负电荷量下降; 使土壤发生胶结作用, 有助于大团聚体的形成。

关键词: 盐分; 土壤; 酸度; 土壤表面电荷; 水稳性团聚体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0164-05

中图分类号: S152.4, S153.3

文献参数: 操庆, 魏晓兰, 吴彩皎, 等. 盐分积累对设施土壤电化学性质和水稳性团聚体影响的模拟研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 164-168. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.028

Simulation Study on Effects of Salt Accumulation on Electrochemical Properties and Water-stable Aggregates in Greenhouse Soil

CAO Qing, WEI Xiaolan, WU Caijiao, SUN Wei, TANG Yan, GU Xungang

(College of Resources and Environment, Anhui Agriculture University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the variations of soil pH value and surface charge under salt stress, and its influences on the structure of soil water-stable aggregates in order to provide basis for the soil amelioration in horticulture and vegetable garden. [Methods] The laboratory incubation experiment was applied to investigate the effects of salt accumulation on pH value, electrochemical properties and water-stable aggregates of yellow cinnamon soil in the surrounding area of Hefei City. Four salinity treatments(0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%) and a control treatment(CK) were set up and incubated for 60 d at 25 °C in incubator. The samples were then collected from the incubator at 10 d, 30 d and 60 d separately, for the following analysis. [Results] Soil pH value decreased with the increase of salt concentration. Compared to CK, soil pH value of the sample incubated after 60 d decreased by 0.53 at 1.2% salinity level. The amount of soil negative charge decreased with the increase of salt concentration, while there was no significant change in positive charge. The simulated salt with Ca^{2+} , Mg^{2+} improved the cementation of micro-aggregates, and resulted in an increase of the amount of macro-aggregates. [Conclusion] Salt can decrease soil pH value and soil negative charge, and improve soil cementation, and also increase the amount of micro-aggregates.

Keywords: salt; soil, acidity; soil surface charge; water-stable aggregate

设施栽培在中国已经得到大面积的推广,能很好的为农民带来更多的经济收入。但设施土壤的盐渍

化问题较为突出,国内外研究和报道也很多^[1-2]。上海郊区设施园艺是有代表性的区域,连续培植蔬菜

收稿日期: 2014-12-22

修回日期: 2015-01-13

资助项目: 国家自然科学基金项目及逆境与植物营养重点实验室共同资助“钾对茶叶低萜类中间体异戊烯焦磷酸合成关键酶的调节研究; 低钾胁迫对茶树叶片低萜类化合物合成的影响及其机制研究”(31470688, 31272235)

第一作者: 操庆(1989—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养的土壤化学。E-mail: okcaoqing@163.com。

通讯作者: 谷勋刚(1967—), 男(汉族), 安徽省阜阳市人, 博士, 教授, 主要从事植物营养生理和茶叶生物化学方面的研究。E-mail: xggu89@ahau.edu.cn。

3 a以上土壤盐分积累较为明显,增幅达到露地盐分含量的 4.0~11.8 倍^[3],导致蔬菜减产,病虫害增加,品质下降。表观上看土壤盐分含量增加直接危害作物生长^[4-5],内在的原因则是改变了土壤的基本理化性状,导致土壤环境恶化,生产潜力降低。当盐分含量达到盐渍化的水平时已经严重制约了农作物的生长^[2,6],生物学的因素主要是由于盐分影响的根细胞内外的离子平衡,控制了细胞的透性,限制了根系对养分的吸收^[7];从土壤化学的角度来看,盐分含量较高影响了水土界面的电荷分布,降低了交换态养分离子的含量,并有可能破坏土壤的结构。土壤表面电荷性质及大小是决定土壤肥力和质量的重要因素^[8];土壤水稳性团聚体是土壤结构的基本单位,量的多少及稳定性的强弱直接反应了土壤结构性的优劣^[9-10]。盐分含量的增加有可能会直接影响到这些土壤理化性质,这方面的基础工作目前研究的较少,本文采用模拟的方法,研究不同浓度的盐分对土壤电化性质以及土壤水稳性团聚体结构的影响,以期对设施园艺及菜园土壤的改良提供基础。

1 材料与方 法

1.1 材料准备

1.1.1 试验土壤 土壤取自合肥市大杨镇周边农田,采集 0—20 cm 表层土壤,去除石块和其他杂物后,混匀,风干,过筛,进一步测定土壤的基本理化性质,结果如下:pH 值为 6.40,有机质和全氮的含量分别为 22.33,1.23 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾的含量分别为 108.61,27.96,118.25 mg/kg。

1.1.2 模拟盐配置 试验模拟安徽省大棚设施盐分,用 $MgSO_4$, $NaCl$, $Ca(NO_3)_2$ 3 种盐(质量比为 1:1:3)配制模拟盐。根据盐渍化分级标准(表 1),设置 5 个处理,分别为:CK,不加模拟盐;处理 A,每千克风干土加模拟盐 3 g(含盐量 0.3%);处理 B,加模拟盐 6 g(含盐量 0.6%);处理 C,加模拟盐 9 g(含盐量 0.9%);以及处理 D 加模拟盐 12 g(含盐量 1.2%)。

表 1 土壤盐化程度分级标准

项目	1	2	3	4	5
盐化程度	非盐化	轻度盐化	中度盐化	重度盐化	盐土
含盐量/%	<0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	0.7~1	>1

1.2 试验设计

试验设置 5 组,过筛处理后的土壤混匀后装盆,每盆 1 kg。先将模拟盐溶于蒸馏水中,再分别加入到各处理,最后用蒸馏水维持土壤含水量为田间持水

量的 70%,设置 3 次重复,恒温 25 °C,每日光照 12 h,培养期间每天以称量记录补加损失水分。分别在 10,30 和 60 d 进行取样,分析各处理土壤 pH 值、土壤表面电荷和水稳性团聚体的分布及含量。

1.3 测定方法及数据分析

1.3.1 土壤酸度的测定 不同处理土壤的 pH 值是在土:水为 1:2.5 的条件下,用玻璃电极(mettler toledo FE30 K)法测定。

1.3.2 土壤表面电荷的测定 改进的 Schofield 法^[11-12]。分别称取相当烘干重 2.00 g 土样若干份于 50 ml 的塑料离心管中,加入 20 ml 0.1 mol/L KCl,在 25±(1) °C 下间歇振荡 12 h,离心,弃去上清液,再用 20 ml 0.01 mol/L KCl 洗 3 次,测定最后 1 次的土壤悬液 pH 值以及 Cl^- 和 K^+ 的含量。最后用 0.5 mol/L NH_4NO_3 洗土壤至没有 Cl^- ,收集 NH_4NO_3 洗液,测定 Cl^- , K^+ 浓度,得到土壤吸附的 K^+ 和 Cl^- 量,分别代表土壤的负电荷量和正电荷量。

1.3.3 团聚体的测定采用常规的湿筛法测定^[13-14]

主要仪器团聚体分析仪,以此可同时分析 4 个土样。先将孔径为 1,0.5,0.25,0.1 mm 套筛用套架一次夹住放入水桶中,再称量 50 g 培养过得土壤小心放入最上层筛上,小心加水,使水漫过最上层土样,又不超过上层筛顶端,浸泡 5 min 后震荡 2 min,取出各筛,烘干筛上残留土样质量。再计算团聚体的百分比。

数据处理与分析采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件进行。

2 结果与讨论

2.1 不同处理 pH 值的变化

pH 值是土壤重要的理化性质之一,其大小是土壤母质长期风化的自然结果,受气候、生物、时间等影响显著。模拟盐溶液带入的交换性阳离子与黏粒表面的 H^+ 和 Al^{3+} 交换,盐分含量增加,提高了土壤溶液中盐基离子的量,促使交换性的 H^+ 和 Al^{3+} 解离进入到溶液中,致使土壤活性酸增加,pH 值降低^[15]。模拟盐溶液带入的 NO_3^- 等强酸性离子也是 pH 值下降的一个原因。

本文研究了盐分的含量对 pH 值的影响,结果见表 2。随盐浓度的提高,培养土壤的 pH 值明显降低。试验中空白处理 pH 值 3 次取样相对较稳定,只有小幅降低,且都稍低于原土的 pH 值,这主要是因为培养的土壤通气状况良好,易发生硝化作用,随着培养时间的延长,逐渐生成了少量的硝酸,使得土壤的 pH 值略有下降^[16]。其中 0.3% 和 0.6% 处理可以

看出 3 次取出的土样 pH 值逐渐降低, 2 次降幅都很明显, 均达到 0.1 个单位左右。但从 1% 处理开始、后 2 个处理 3 次取样的 pH 值降幅越来越小, 第 1 次取出的土样 pH 值已经降得很低, 后 2 次取样变化已经不明显。随着培养时间的增长, 所培土壤的 pH 值逐渐接近定值 5.83, 随着盐分浓度的增加, 达到这个定值所需的时间越来越短, 1.2% 处理第 1 次取样 pH 值已经降到 5.87。第 1 次取样和第 2 次取样, 5

个处理间的变化均达到极显著水平, 第 3 次取样的前 4 个处理间也达到极显著水平, 可能是因为高浓度的盐分已经交换出吸附态的 H^+ 和 Al^{3+} , 培养时间的延长已经很难继续置换出土壤表面的潜性酸。

本试验中, 随着时间的增, 盐分浓度的升高, 该土壤 pH 值较空白最大可以下降 0.53 个单位。这与余海英等^[6]、范庆峰等^[17]、姚春霞等^[18]的关于设施土壤盐分对土壤 pH 值的影响研究结果类似。

表 2 盐分对土壤 pH 值的影响

培养时间/d	CK	A	B	C	D
10	6.37±0.02 ^a	6.25±0.02 ^b	6.04±0.01 ^c	5.93±0.01 ^d	5.87±0.01 ^e
30	6.36±0.02 ^a	6.13±0.02 ^b	5.94±0.01 ^c	5.89±0.01 ^d	5.85±0.01 ^e
60	6.36±0.02 ^a	6.04±0.02 ^b	5.86±0.02 ^c	5.83±0.02 ^d	5.83±0.01 ^d

注: CK 为空白处理; A, B, C, D 分别为 0.3%, 0.6%, 0.9% 和 1.2% 处理。数据为平均值±标准差(X±SD); 同一行字母相同者, 表示在 0.05 水平差异不显著。下同。

2.2 不同处理对土壤表面电荷的影响

由于该地区黄褐土含有大量的 2:1 型黏土矿物, 主要是永久负电荷决定着其表面化学性质, 属于恒电荷土壤, 但亦含有一定量的氧化铁、铝及腐殖质, 所以这类土壤中既含有永久负电荷, 也有可变负电荷, 属两类表面共存体系, 因此其表面电荷会受环境条件的影响^[19]。

从表 3 可以看出, 土壤表面负电荷的变化与 pH

值变化相似。土壤经过 2 个月的培养, 空白处理土壤表面负电荷没有变化; 其他处理随着培养时间的延长, 土壤表面负电荷逐渐下降。其中, 0.6% 处理 3 次取样下降幅度最为明显, 后面的处理下降幅度越来越小。3 次取样 5 个处理间均达到极显著水平。随着时间的增长和浓度的增加, 所培土壤的表面负电荷量接近定值 17.26。可以看出, 盐溶液处理后的该土壤, 土壤表面负电荷量最大可下降 2.5 cmol/kg。

表 3 盐分对土壤表面负电荷的影响

培养时间/d	CK	A	B	C	D
10	19.77±0.02 ^a	19.13±0.02 ^b	18.51±0.02 ^c	17.89±0.01 ^d	17.51±0.02 ^e
30	19.77±0.02 ^a	18.86±0.01 ^b	18.25±0.02 ^c	17.72±0.03 ^d	17.42±0.03 ^e
60	19.77±0.02 ^a	18.58±0.02 ^b	17.82±0.02 ^c	17.51±0.02 ^d	17.26±0.02 ^e

土壤表面电荷直接与土壤的保肥性能相关, 由表 3 可见, 盐渍土壤表面负电荷下降, 因此保肥性能将降低。合肥周边地区大多为黄褐土, 盐分对负电荷影响较大, 设施土壤中盐渍化现象更为普遍, 无疑会影响黄褐土的保肥能力。菜园土壤盐分含量高于农田土壤, 推测起来, 菜园土壤土壤盐基养分离子流失量将高于农田土壤。

土壤表面正电荷量各处理间变化不明显, 且含量都很低, 对恒电荷土壤, 游离氧化铁铝含量低, 吸附阴离子主要靠边缘断键形成的羟基或配位水分子^[20], 所以用盐溶液处理后, 正电荷量并无变化。

2.3 不同处理对不同粒径水稳性团聚体组成含量的影响

在有机质含量较低的土壤中, 团聚体的形成主要依靠黏粒的内聚力和多价金属阳离子连接、吸附极性

有机分子, 形成配位络合物和有机无机复合胶体^[21]。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 随盐溶液的加入, 在土壤胶体之间易于形成桥键, 有助于团聚体的形成^[22]。

由表 4 可见, 受不同浓度盐分影响最大的是 <0.1 mm 的团聚体和 >1 mm 的团聚体。从总体趋势来看, 所有处理均随培养时间的增加, 小团聚体的比例逐渐减小, 形成较大的团聚体。第 10 d 时, 随着盐分浓度的增加, <0.1 mm 团聚体逐渐减少, 且在 0.05 水平上差异显著; 而 >0.5 mm 团聚体含量, CK 和 A 处理大于 B, C 和 D 处理, 这有可能是因为 B, C, D 处理盐分浓度过高, 抑制了土壤中微生物的活性, 而微生物是土壤团聚体形成了一个重要因素^[23]。随着培养时间的增加, 阳离子的胶结作用越来越明显, 第 60 d 时 D 处理的 <0.1 mm 的团聚体含量为 CK 的 73%, 而 >1 mm 的团聚体含量为 CK 的 165%。

表 4 盐分对水稳性团聚体数量和分布的影响

培养时间/d	处理	不同粒径水稳性团聚体含量/%				
		<0.1 mm	0.1~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	>1 mm
10	CK	58.25±2.80 ^a	20.17±1.52 ^c	14.46±1.06 ^d	5.83±0.45 ^b	1.29±0.12 ^a
	A	52.33±2.25 ^b	24.14±1.37 ^d	16.29±0.86 ^c	6.06±0.36 ^a	1.18±0.15 ^{ab}
	B	46.80±1.73 ^c	28.32±1.88 ^c	19.26±1.36 ^a	4.57±0.33 ^c	1.05±0.10 ^b
	C	43.23±1.88 ^d	32.72±1.06 ^b	18.54±0.97 ^{ab}	4.52±0.21 ^c	0.99±0.10 ^b
	D	41.51±2.06 ^d	36.50±1.10 ^a	17.02±1.04 ^b	4.08±0.28 ^c	0.89±0.08 ^b
30	CK	44.32±2.73 ^a	22.15±1.26 ^b	16.30±1.43 ^b	8.85±0.30 ^b	8.38±0.20 ^c
	A	43.18±2.54 ^a	25.27±1.49 ^a	17.38±1.36 ^{ab}	7.13±0.16 ^c	7.04±0.16 ^c
	B	39.69±1.68 ^b	22.36±1.55 ^b	20.68±0.95 ^a	5.26±0.20 ^d	12.01±0.18 ^b
	C	32.95±2.10 ^c	24.28±1.19 ^a	19.10±0.88 ^a	9.26±0.25 ^a	14.41±0.22 ^a
	D	30.77±2.54 ^c	24.10±2.09 ^a	21.43±1.30 ^a	8.73±0.36 ^b	14.97±0.16 ^a
60	CK	37.02±1.86 ^a	21.73±1.65 ^b	18.10±1.17 ^a	9.58±0.42 ^b	13.57±0.25 ^d
	A	35.69±1.93 ^a	23.68±1.68 ^a	19.44±1.25 ^a	8.03±0.38 ^c	13.16±0.15 ^d
	B	36.32±2.03 ^a	20.72±1.25 ^b	19.46±0.90 ^a	10.80±0.26 ^b	15.70±0.17 ^c
	C	29.17±2.12 ^b	18.70±1.75 ^c	20.10±1.42 ^a	11.65±0.36 ^a	20.38±0.28 ^b
	D	27.04±2.36 ^c	18.64±1.37 ^c	19.76±1.33 ^a	12.13±0.29 ^a	22.43±0.23 ^a

注:同一培养时间内,同一列字母相同表示在 0.05 水平差异不显著。

其中>0.25 mm 的大团聚体含量如图 1 所示,随着培养时间增加,各处理的>0.25 mm 大团聚体都呈递增趋势,B,C,D 处理各时间点均高于 CK 处理,而在 10,30 和 60 d,A 处理分别为 CK 的 109%,94%,98%。由于所培土壤中 Ca²⁺ 占主导地位,水稳性大团聚体总体还是呈递增趋势,加盐 1.2% 的 D 处理培养 60 d 后,>0.25 mm 的大团聚体含量为 CK 的 132%。

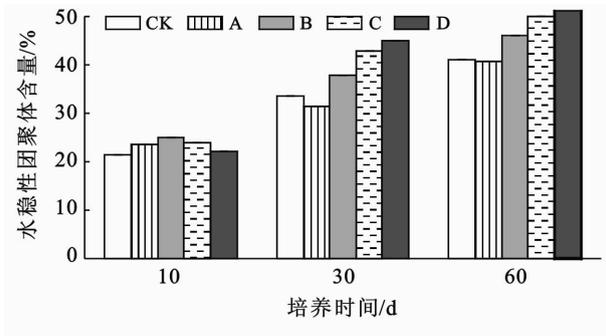


图 1 >0.25 mm 水稳性团聚体含量

土壤团聚体的形成是个极为复杂的过程,其形成的详细机理尚不清楚。但目前已知对团聚体形成的影响因素包括有机质含量及组成、黏粒、可溶性阳离子与碳酸盐、土壤微生物和 pH 值等^[24]。本试验的模拟盐中加入了 Ca²⁺,Mg²⁺ 和 Na⁺,其中 Na⁺ 是土壤分散剂^[25],Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 是土壤胶结剂^[22]。但 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 在模拟盐中含量较多,所以土壤团聚体含量随盐分增加呈递增趋势。这与赵凤艳等^[2] 和余海英等^[6] 研究结果一致,他们的报道中也指出,盐渍化土

壤中水稳性团聚体含量增加明显,但土壤发生板结,通气透水性变差。

因此,容易板结的土质,控制土壤 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量的增加尤为重要。土壤水稳性团聚体是指土壤结构优劣的其中一项指标,盐分对土壤结构其他方面指标的影响还有待进一步的研究。

3 结论

(1) 盐分对土壤性质有重要影响,高浓度的盐分会使土壤 pH 值下降。盐分浓度越大下降的越快越明显,该土壤 pH 值在一个半月的培养下较空白最大可以下降 0.53 个单位;

(2) 盐溶液处理影响后的该土壤,其土壤表面负电荷量最大可下降 2.5 cmol/kg,正电荷密度则无明显影响;

(3) 盐分对土壤团聚体的影响机理比较复杂,本研究表明在含 Ca²⁺,Mg²⁺ 较多的高浓度的盐分影响下,土壤中胶结作用明显,大团聚体含量增加。

[参 考 文 献]

- [1] Ladenburger C G, Hild A L, Kazmer D J, et al. Soil salinity patterns in Tamarix invasions in the Bighorn Basin, Wyoming, USA[J]. Journal of Arid Environments, 2006,65(1):111-128.
- [2] 赵凤艳,吴凤芝,刘德,等. 大棚菜地土壤理化特性的研究[J]. 土壤肥料,2000(2):11-13.
- [3] 童有为,陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报,1991,18(2):159-162.

- [4] 李加宏,俞仁培. 水—土壤—植物系统中水分的迁移和植物耐盐性研究进展[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6): 9-20.
- [5] Yildirim E, Taylor A G, Spittler T D. Ameliorative effects of biological treatments on growth of squash plants under salt stress [J]. Scientia Horticulturae, 2006, 111(1): 1-6.
- [6] 余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 581-586.
- [7] 李彦,张英鹏,孙明,等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 植物生理科学, 2008, 24(1): 258-264.
- [8] 吴金明,刘永红,李学垣,等. 我国几种地带性土壤无机胶体的表面电荷特性[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 177-183.
- [9] 薛冉,郭雅婧,苗福泓,等. 短期放牧对高原草甸土壤水稳性团聚体构成及稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 82-86.
- [10] 赵京考,刘作新,韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 163-166.
- [11] Gillman G F, Uehara G. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals(II): Experimental[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(2): 252-255.
- [12] Marcano-Martinez E, McBride M B. Comparison of the titration and ion adsorption methods for surface charge measurement in oxisols [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 1040-1045.
- [13] Amézketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2): 83-151.
- [14] Murer J E, Baumgarten A, Eder G, et al. An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability(SAS) [J]. Geoderma, 1993, 56(1/2/3/4): 539-547.
- [15] Khattak R A, Jarrell W M. Salt-induced manganese solubilization in California soils[J]. Soil Science Society of America Journal. 1988, 52(6): 1060-1611.
- [16] 唐罗忠,生原喜久雄,户田浩人,等. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 103-107.
- [17] 范庆峰,张玉龙,陈重. 保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及 pH 值的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 103-106.
- [18] 姚春霞,陈振楼,许世远. 上海市郊保护地土壤盐分研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1372-1376.
- [19] 杨亚提,张一平,张兴福. 恒电荷土壤胶体表面的电荷特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2002, 30(1): 47-51.
- [20] 廖丽霞,胡红青,贺纪正. 有机酸对恒电荷土壤表面电荷性质的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 865-870.
- [21] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-419.
- [22] 李小刚,曹靖,李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 64-71.
- [23] 陈智,蒋先军,罗红燕,等. 土壤微生物生物量在团聚体中的分布以及耕作影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5964-5969.
- [24] 赵京考,刘作新,韩永俊. 土壤团聚体的形成于分散及其在农业生产上的应用[J]. 水土保持学报. 2003, 17(6): 163-166.
- [25] Abu-Sharar T M, Bingham F T, Rhoades J D. Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and dis aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(2): 342-346.

(上接第 163 页)

- [12] 吴泽斌,刘卫东. 基于粮食安全的耕地保护区经济补偿标准测算[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2076-2086.
- [13] 雍新琴,舒帮荣,陈龙高,等. 耕地保护县域补偿机制研究[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1863-1870.
- [14] 张效军,欧名豪,高艳梅. 耕地保护区补偿机制研究[J]. 中国软科学, 2007(12): 47-55.
- [15] 王苗苗. 湖南省耕地保护区际补偿机制研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [16] 廖和平,王玄德,沈燕,等. 重庆市耕地保护区补偿价值标准研究[J]. 中国土地科学, 2011, 25(4): 42-48.
- [17] 周建春. 耕地估价理论与方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [18] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 3(13): 10-13.
- [19] 唐华俊,陈佑启,邱建军,等. 中国土地利用/土地覆盖变化研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 172-175.