

两种农作体系施肥对土壤质量的影响

寇长林^{1,2}, 巨晓棠^{1*}, 高 强¹, 甄 兰¹, 张福锁¹

(1. 教育部植物-土壤相互作用重点实验室、农业部植物营养与养分循环重点实验室、中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094;
2. 河南省农业科学院土壤肥料研究所, 郑州 450002)

摘要:不同农作体系施肥措施差异引起的土壤环境质量变化, 会进一步影响该体系的生产力并对大气和水体环境产生潜在影响。选取中国北方两种重要的集约化种植体系(大棚蔬菜和小麦-玉米轮作体系), 研究了经过长期施肥后, 0~30cm 土壤有机质、全氮、微量元素与重金属的差异以及 0~90cm 土壤剖面的硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾、pH 和电导率的变化。结果表明, 大棚菜地氮、磷、钾化肥投入量达 N 2823、P 928 和 K 925 kg/(hm²·a), 分别为小麦-玉米轮作农田的 4.7、10.1 和 23.4 倍。大棚菜地还施用了大量的有机肥。菜地土壤养分大量积累, 尤其是硝态氮和速效磷, 0~90cm 土层二者分别达 1389.8 kg N/hm² 和 1321.1 kg P/hm², 为农田的 5.6 和 8.4 倍。速效钾和铵态氮累积量分别为 1817.3 kg K/hm² 和 100.4 kg N/hm², 为农田的 2.2 倍和 1.8 倍。同时, 大棚菜地土壤中的养分还存在严重的淋溶现象。大棚菜地有机质、全氮和有效铁、锰、铜、锌含量分别为农田的 1.3、1.4、1.2、1.3、1.3 和 1.4 倍。镉含量为农田的 3.8 倍。镉与土壤速效磷含量呈显著正相关, 可见, 磷肥的大量投入是镉在土壤中累积的主要原因。大棚菜地各层土壤 pH 均明显低于农田相应土层 pH, 而 0~30cm 和 30~60cm 土层的电导率则显著高于农田, 菜地土壤存在明显的酸化现象和严重的盐分累积, 并以上层为甚。各层土壤电导率与硝态氮含量呈显著正相关, 而 pH 与硝态氮含量呈幂函数降低关系, 硝酸盐的累积在土壤盐渍化和酸化过程中起主导作用。

关键词:大棚蔬菜; 小麦-玉米轮作; 养分累积; 电导率; pH; 微量元素; 重金属

Effects of fertilization on soil quality in two different cropping systems
KOU Chang-Lin^{1,2}, JU Xiao-Tang¹, GAO Qiang¹, ZHEN Lan¹, ZHANG Fu-Suo¹ (1. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions MOE, Key Laboratory of Plant Nutrition MOA, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094; 2. Institute of Soil and Fertilizer, He'nan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2548~2556.

Abstract: Changes of soil quality caused by different fertilization under different cropping systems may affect the production, and potentially air and water quality. This paper investigated the differences of OM, total N, microelements and heavy metals in 0~30cm soil layer and NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, available P and K, pH and electrical conductivity in 0~90 cm soil profile after long-term different fertilization in two cropping systems, rotation of wheat and corn and plastic greenhouse vegetable in north China. The results showed that the chemical fertilizer rates for N, P and K applied to vegetable fields were as high as 2823, 928 and 925 kg/(hm²·a), being 4.7, 10.1 and 23.4 folds of that applied to wheat-corn system, respectively. In addition, large amount of organic fertilizer was applied to protected vegetable. A great amount of nutrients accumulated in the vegetable soil, especially NO₃⁻-N and available P which amounted to 1389.8 kg N/hm² and 1321.1 kg P/hm² in 0~90cm soil layer and were 5.6 and 8.4 times of that in wheat-corn soil, respectively. Available K and NH₄⁺-N accumulated in 0~90cm soil layer amounted to 1817.3 kg K/hm² and 100.4 kg N/hm² and were only 2.2 and 1.8 times of that in wheat-corn soil. Nutrients

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270787 和 30390081); 国家十五攻关重大专项资助项目(2002BA516A02)
收稿日期:2004-02-17; **修订日期:**2004-07-30
作者简介:寇长林(1965~), 男, 河南宝丰人, 博士生, 副研究员, 主要从事中低产田治理及其农业持续发展研究。
*** 通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: Juxt@cau.edu.cn
Foundation item: the National Natural Sciences Foundation of China(No. 30270787 and 30390080), The National Key Project in the Tenth 5-year Plan for Key Problems
Received date: 2004-02-17; **Accepted date:** 2004-07-30
Biography: KOU Chang-Lin, Ph. D. candidate, Assistant professor, mainly engaged in improvement of cropland with the medium and low yield, N cycle of agroecosystem and its effects on environment.

accumulated in vegetable soil were also seriously leached down to deep soil layer. The other nutrients, OM, total N and available Fe, Mn, Cu and Zn accumulated in the soil of plastic greenhouse were only 1.3, 1.4, 1.2, 1.3, 1.3 and 1.4 folds of those in wheat-corn field. Soil concentration of Cd in vegetable field was 2.8 folds of that in wheat-corn field. The significantly positive correlation of soil concentration of Cd with available P meant that large application dose of P fertilizer may be the source of Cd accumulated in soil. Soil pH in vegetable field was lower than wheat-corn field in all 3 layers, while the electrical conductivity was higher in 0~30cm and 30~60cm soil layers. Obvious soil acidification and severe accumulation of salt was observed, especially in 0~30cm soil layer in vegetable field. Soil electrical conductivity was positively correlated with nitrate content, while pH decreasingly related with nitrate with power function, and this indicted that accumulation of NO_3^- -N in soil was the main factor inducing soil salinization and acidification.

Key words: plastic greenhouse vegetable; wheat-corn rotation system; nutrient accumulation; electrical conductivity; pH; micronutrients; heavy metal

文章编号:1000-0933(2004)11-2548-09 中图分类号:S344.13;S147.2 文献标识码:A

农业集约化是近年来全球农业的发展趋势,以高产品种、灌溉、化肥、农药等投入为特点的集约化农业对过去 50a 粮食增产发挥了主导作用^[1]。20 世纪80 年代以来,随着中国经济的快速增长及人民生活水平的大幅度提高,人们的食物需求结构发生了很大变化,由此导致了蔬菜尤其是大棚蔬菜生产迅猛发展。特别是在中国北方,以日光温室为主体的蔬菜保护地生产已成为广大农村的支柱性产业之一。据统计,仅 1996~1999 年,大棚蔬菜即由 69.8 万 hm^2 增至 133.3 万 hm^2 ,增长了近 1 倍^[2]。

合理施肥和保持协调的土壤养分供应是保证蔬菜高产优质生产的关键,但是在实际生产中,由于蔬菜具有较高的市场价值,菜农为了保证高产盲目地大量施用肥料,即使大田作物,为了保证高产,农户也盲目地投入大量肥料。特别是近年来,化学肥料的施用量越来越高,在一些发达地区和集约化程度较高的地区,大田作物氮肥用量达 500~600 $\text{kg N}/\text{hm}^2$,菜地氮肥用量达 3300 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[3],远远超过作物的需求量。不仅造成养分资源的大量浪费,还会导致土壤中养分的累积与土壤质量的降低,并对土壤、水体和大气等生态环境构成潜在威胁^[4,5]。有研究表明,集约化农田(小麦-玉米两熟制)氮素年盈余量达 125~230 $\text{kg N}/\text{hm}^2$,0~1.2m 土层无机氮累积量超过 300 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[6]。这个值已远高于荷兰人所认为的夏季收获后根层土壤无机氮残留量 45 或 70 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 的临界值^[7]。蔬菜生产中肥料施用量大,灌水量和次数又高于一般农田,因而,菜地的养分累积情况更加严重,环境压力更大。据研究,大棚蔬菜施肥连同灌水每年氮盈余量可达 2700 $\text{kg N}/\text{hm}^2$,磷盈余量达 750 $\text{kg P}/\text{hm}^2$ ^[8],0~1m 土体硝态氮累积量可高达 500 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[9],淋洗损失多在 150~300 $\text{kg N}/\text{hm}^2$,高的可达 370 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[10],成为氮素污染的重要来源^[11]。磷肥多含有 Pb、Cd 等重金属元素,大量施磷肥在提高土壤供磷水平的同时,也导致这些元素在土壤中的累积超标^[12~14]。Jinadasa 等认为,土壤中含 0.3mg Cd/kg 即可导致蔬菜镉含量超标^[15]。

大棚蔬菜长期大量施用化肥伴随地表覆盖栽培,还导致了土壤盐分累积现象明显,从而促使土壤酸化和次生盐渍化的形成,这已成为保护地蔬菜生产的主要土壤障碍因子^[2,16]。本文研究了华北平原主要种植模式小麦-玉米轮作农田与大棚蔬菜地土壤养分累积与土壤性状的差异,以便探讨由大田作物转变为大棚蔬菜过程中土壤性状变化及其可能对环境产生的不利影响。

2 材料与方法

2.1 研究区基本概况

以华北平原典型集约化农作区山东省惠民县为研究区域。其地处黄河冲积平原的南端,地理位置为北纬 37°6′~37°36′,东经 117°16′~117°49′,平均海拔 12.8 m,地面坡度六千分之一,无霜期 182d,平均气温 12.3℃,年均降水量 578mm(近 30a 平均),61%~84%(平均 72%,最近 20a 结果)集中在 6、7、8 三个月。全县总面积 1357 km^2 ,耕地面积 7.35 万 hm^2 ,主要土壤为壤质和沙质潮土。本研究选择惠民县淄角镇为代表,淄角镇位于本县中部偏西,耕地面积 3551 hm^2 。主要种植作物为小麦、玉米、大棚蔬菜、棉花。

2.2 样品采集

于淄角镇的西张六、西李集和闫家河 3 个村分别选取 10 个大棚和 10 块小麦-玉米田,在小麦收获后和蔬菜采收结束后取样,采样时间为 2002 年 6 月 18~29 日。大棚种植年限 1~12a,在改种大棚蔬菜前,这些地块常年种植方式为小麦-玉米轮作。大棚主要种植蔬菜为黄瓜、辣椒、番茄及少数芹菜、茴香与豆角。每个田块和大棚按 30cm 一个层次采集 0~90cm 土壤 4 个样点,小麦-玉米轮作农田各采样点选在小麦行间,大棚蔬菜各采样点选在行内两植株间,同一层次 4 个样点土壤混合均匀装入塑料袋中标记密封并放入冰盒中,土壤样品带回实验室用于分析。

2.3 样品测定方法

将新鲜土壤样品迅速过 5mm 筛后分作两份,一份用于测定土壤无机氮(硝态氮和铵态氮),另一份风干后分别过 1mm、

0.25mm 筛用于测定土壤pH、电导率、全氮、有机质、速效磷、速效钾、有效Zn、Mn、Fe、Cu 和重金属Pb、Cd。土壤无机氮测定采用0.01 mol/L 的CaCl₂ 溶液浸提,用流动分析仪(TRAACS 2000,BRAN+LUEBBE 公司,德国)测定硝态氮和铵态氮。土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法,全氮采用凯氏定氮法,速效磷(Olsen-P)采用0.5 mol/L 的NaHCO₃ 浸提-分光光度法,速效钾采用1 mol/L 的NH₄OAC 浸提-火焰光度法,微量元素和重金属采用DTPA 浸提-ICP 法(Optima 3300 DV, Perkin Elmer 公司,美国)。

2.4 养分投入量的计算

根据取样田块 2001~2002 年度小麦、玉米和大棚蔬菜所施肥料计算年度养分投入量,其中化肥养分含量按农户施用肥料包装上所标示养分含量计算,主要品种为尿素、二铵、复混肥等。有机肥养分含量根据所施肥料种类参照《中国有机肥料养分》^[17]确定,主要类型为牛栏粪、鸡粪和饼肥(麻子饼)。

2.5 数据处理与统计方法

本研究数据处理采用Excel 方法,采用SAS6.1 的ANOVA 程序包进行两个体系间施肥、土壤养分含量、累积量以及pH 和电导率的T 检验,运用PROC NLIN 进行pH、电导率和硝态氮含量的回归分析。

3 结果与分析

3.1 两种种植体系施肥量的差异

调查计算结果表明(表1),两种种植体系施肥量差异很大,无论是化肥还是有机肥,氮磷钾差异均达极显著水平。就化肥来说,大棚蔬菜氮、磷、钾投入量分别为小麦玉米轮作农田的4.7、10.1 和23.4 倍,氮磷钾总投入量为6.4 倍。有机肥氮磷钾投入量大棚蔬菜分别为农田的33.0、26.7 和15.2 倍,氮磷钾总投入量为23.9 倍。按照山东省对大棚蔬菜的推荐施肥量为N 750~1030 kg/hm²、P 180~300 kg/hm²、K 225~375 kg/hm²^[18],小麦-玉米全年的推荐施肥量为N 300~390 kg/hm²、P 80~90 kg/hm²、K 0~150 kg/hm²^[19],两个体系的实际施肥量极大地超过了推荐量。

3.2 两种种植体系土壤有机质和全氮含量的差异

大棚菜地0~30cm 土壤有机质含量(图1)介于10.50~24.02 g/kg 之间,平均含量16.81 g/kg,小麦-玉米轮作农田土壤有机质含量介于10.89~15.55 g/kg,平均13.17 g/kg,大棚菜地土壤有机质含量显著高于农田,平均是农田的1.3 倍。

大棚菜地土壤全氮含量介于0.92~1.90 g/kg,平均1.34 g/kg,小麦-玉米轮作农田土壤全氮含量介于0.83~1.27 g/kg,平均0.97 g/kg,大棚菜地土壤全氮含量显著高于农田,平均为农田的1.4 倍。总体上看,大棚菜地土壤有机质和全氮含量变异性比农田大。

表1 两种种植体系施肥情况对比

Table 1 Amount of fertilizer applied in two cropping systems

种植体系 Cropping system	样本数 Sample No.	统计项 Statistic items	产量 ^① Yield (kg/(hm ² ·a))	化肥 Fertilizer (kg/(hm ² ·a))			有机肥 Manure (kg/(hm ² ·a)) ^③			总养分投入量 (kg/(hm ² ·a))		
				N	P	K	N	P	K	N	P	K
大棚蔬菜	30	平均 Average	87.0	2823	928	925 ^②	1847	481	991	4669	1409	1916
		范围 Range	7~171	375~7344	176~3252	0~2655	23~4775	4~1380	39~2794	923~9223	253~3953	54~3678
		CV(%)	50.6	70	82	83	69	75	67	47	57	57
小麦-玉米	30	平均 Average	11.3	606	92	38 ^④	56	18	65	— ^⑤	—	—
		范围 Range	8.3~13.5	240~1099	25~154	0~137	0~246	0~80	0~286	—	—	—
		CV(%)	12.4	30	39	99	159	159	159	—	—	—
T-test				*** ^⑥	***	***	***	***	***	***	***	

①蔬菜产量为全年鲜重,小麦玉米为籽粒风干重Vegetable yield was expressed as annual fresh weight yield, the yield of wheat and corn was air-dried weight yield;②调查的30 个大棚中3 个没施钾肥 Three of 30 plastic greenhouse vegetable fields surveyed were not applied potassium fertilizer;③调查的30 块农田中,有10 块在小麦生长季节施用有机肥,玉米生长季节均不施有机肥 Ten of 30 wheat fields surveyed were applied manure during wheat growing season, all 30 fields were not applied manure during corn growing season;④调查的30 块农田中,有8 块小麦生长季节施用钾肥,14 块玉米生长季节施用磷、钾肥 Eight of 30 wheat-corn fields surveyed were applied potassium fertilizer on wheat, and 14 fields were applied phosphorus and potassium fertilizer during corn growing season;⑤调查的30 块农田中,仅有10 个田块在小麦季施用有机肥,故该项不计算养分总投入量 Ten of 30 wheat-corn fields surveyed were applied manure during wheat growing season, So total nutrients were not summed up in wheat-corn system;⑥表示两种种植体系养分投入量差异达0.001 显著水平The difference of the mean nutrient input between two systems are significant at $P<0.001$ 。

3.3 两种种植体系土壤无机氮累积的差异

大棚菜地不同土层硝态氮累积量显著高于小麦-玉米轮作农田(图1),就0~90cm 土层硝态氮累积量来看,小麦-玉米轮作农田介于94.1~689.8 kg N/hm²,平均为248.1 kg N/hm²,大棚菜地介于273.9~4218.7 kg N/hm²,平均为1389.8 kg N/hm²,为农田的5.6倍。而铵态氮含量在两系统间差别要小得多,0~90cm 土层小麦-玉米轮作农田土壤铵态氮含量56.6 kg N/hm²,大棚菜地为100.4 kg N/hm²,约为前者的1.8倍。

同一类型田块土壤累积的硝态氮均显著高于铵态氮,大棚菜地0~90cm 土层累积的硝态氮总量为铵态氮的13.8倍,而小麦-玉米轮作农田0~90cm 土层累积的硝态氮总量为铵态氮的5.4倍,即大棚菜地无机氮的91%为硝态氮,而农田土壤硝态氮占无机氮的79%。由于无机氮主要以硝态氮为主,所以两系统间无机氮(Nmin)的差异趋势类似于硝态氮,小麦-玉米轮作农田0~90cm 土壤无机氮累积量为304.7 kg N/hm²,而大棚蔬菜高达1490.3 kg N/hm²,大棚菜地为农田的4.9倍。就硝态氮、铵态氮和无机氮总量在土壤剖面的分布来看,0~90cm 土壤剖面中,大棚蔬菜土壤硝态氮、铵态氮以及无机氮总量均随土壤深度增加而降低,而小麦-玉米轮作农田只有铵态氮表现如此,但硝态氮和无机氮总量则随土壤深度的增加而增加。

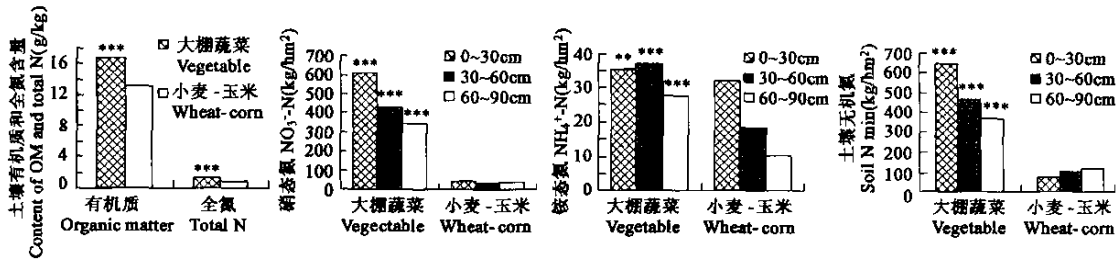


图1 两种植体系不同层次土壤养分含量

Fig. 1 Concentration and accumulation of nutrients in soils of two cropping systems

*, **, *** 分别表示两种体系间同一层次土壤养分含量差异达 0.05, 0.01, 0.001 水平, 以下同 Indicated the differences of nutrient concentration in the same soil layer between two systems are significant at $p < 0.05$, 0.01, and 0.001 respectively; the same below

3.4 两种植体系土壤速效磷钾累积的差异

大棚菜地土壤不同层次速效磷(Olsen-P)含量(图2)介于9.8~280.0 mg P/kg,小麦-玉米地介于2.0~43.0 mg P/kg。从0~90cm 土层速效磷累积总量来看,小麦-玉米轮作农田土壤为158.0 kg P/hm²,大棚菜地为1321.1 kg P/hm²,为农田的8.4倍。速效磷在土壤剖面的分布在两种体系中表现出相似趋势,随剖面深度的增加而降低。同时,大棚菜地各层土壤速效磷含量均显著高于农田。

大棚菜地不同土层土壤速效钾含量介于61.7~348.4 mg K/kg,小麦-玉米轮作农田土壤介于35.5~129.8 mg K/kg,大棚菜地各层速效钾含量均高于农田。从土壤速效钾累积量来看,农田0~90cm 土体土壤速效钾累积量811.2 mg K/hm²,大棚菜地土壤为1817.3 mg K/hm²,为农田的2.2倍。就速效钾在土壤0~90cm 剖面的分布来说,大棚菜地速效钾随土壤深度的增加而降低,而农田土壤速效钾含量在各层差异不大(图2)。

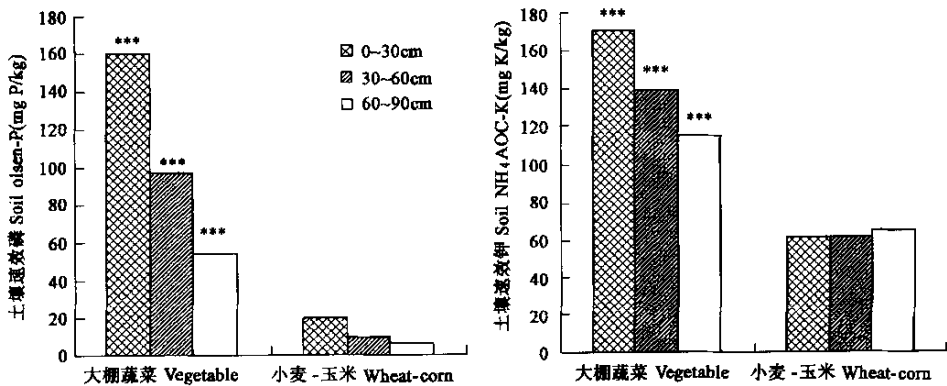


图2 两种植体系土壤不同层次速效磷钾的含量

Fig. 2 Accumulation of P and K in soils of two cropping systems

3.5 两种种植体系土壤pH和电导率的差异

大棚菜地不同层次土壤pH值介于7.76~8.90,小麦-玉米轮作农田介于8.32~8.96,同一层次土壤pH大棚菜地显著低于农田(图3)。从土壤pH在0~90cm土体剖面变化来看,大棚菜地pH最低值出现在0~30cm的表层,并随土壤深度的增加而升高,但小麦-玉米田各层土壤pH没有显著差异。这说明大棚蔬菜由施肥而引起的土壤pH下降随深度的增加而减弱。

土壤各层pH与硝态氮含量呈幂函数降低关系(图4),这说明大量施用氮肥引起土壤硝酸盐累积是土壤酸化的关键因子。

大棚菜地0~30cm、30~60cm、60~90cm土壤电导率平均分别为0.579 ms/cm、0.452 ms/cm和0.403 ms/cm,小麦-玉米大田平均分别为0.241 ms/cm、0.313 ms/cm、0.385 ms/cm,除60~90cm层次两系统间土壤电导率无显著差异外,其它两层二者差异显著,大棚菜地分别为农田的2.4和1.4倍(图5)。

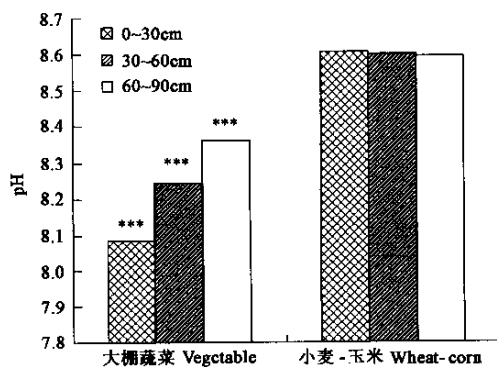


图3 两种种植体系不同层次土壤pH

Fig. 3 Soil pH in different soil layers of two cropping systems

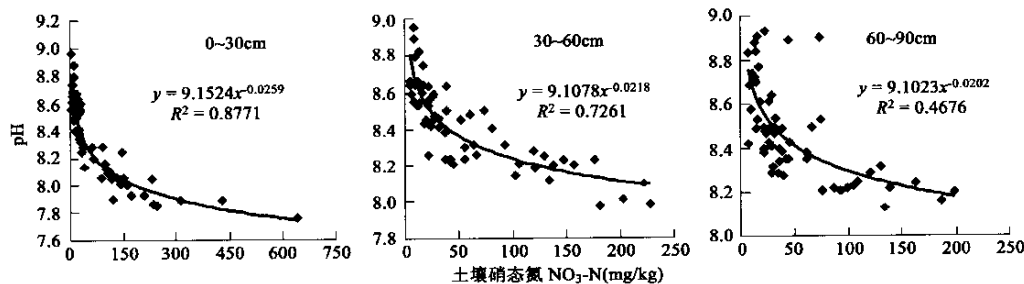


图4 土壤pH和土壤硝态氮含量的关系($n=60$)

Fig. 4 Correlation of pH with soil NO_3^- -N

从电导率在土体剖面的分布来看,大棚菜地表现出随土壤深度的增加而降低趋势,而小麦-玉米轮作农田则与之相反。这说明大棚蔬菜因施肥而引起的土壤盐化随土层加深而减弱,而农田土壤电导率随土层加深而增强,其变化趋势与各层土壤硝态氮的变化趋势相吻合。

对各层土壤电导率与硝态氮含量的相关分析表明,二者均存在极显著正相关,并随土壤深度的增加相关系数减小,说明硝态氮的累积是引起土壤盐分累积的主要因素,0~30cm土层硝酸盐变化可解释90%的电导率变异(图6)。

3.6 两种种植体系土壤微量元素和重金属累积的差异

大棚菜地土壤0~30cm有效Fe、Mn、Cu、Zn含量显著高于小麦-玉米地(图7),平均分别为农田的1.2、1.3、1.3和1.4倍。这可能是由于大棚菜地大量施用有机肥引起的。

大棚菜地铅含量显著低于小麦-玉米地(图8),小麦-玉米田平均为大棚土壤的1.1倍。其原因可能与大棚菜地长期采用塑料薄膜覆盖,充分阻止了大气铅的干湿沉降引起。土壤中铅的主要来源为大气沉降、污泥和厩肥的施用等,在广大的农业区大气干湿沉降是其最主要来源,可占总量的25%~85%^[20],每年每公顷在几克到上百克,一般多在30g/(hm²·a)以上^[20,21]。

土壤镉含量则与铅相反,大棚菜地显著高于农田土壤,大棚菜地土壤镉含量为农田的2.8倍。对土壤镉含量与土壤速效磷相关分析表明(图9),二者呈显著正相关。

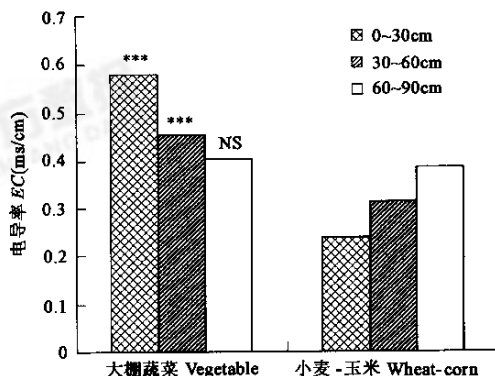


图5 两种种植体系不同层次土壤电导率(NS表示差异不显著)

Fig. 5 Electrical Conductivity (EC) of different soil layers in two cropping systems (NS means no significant difference)

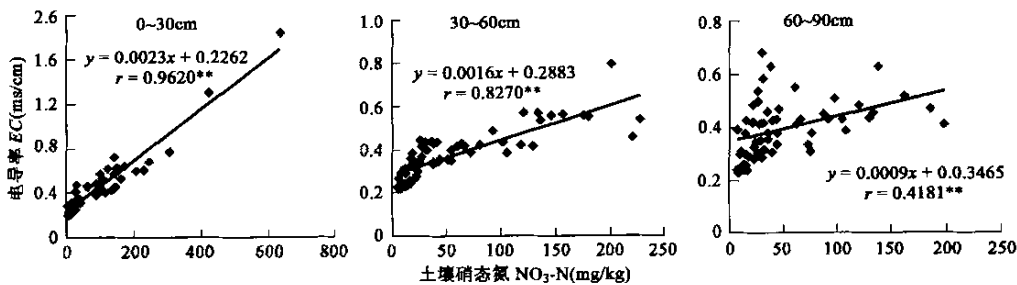


图6 土壤电导率与土壤硝态氮含量的相关性($n=60$)

Fig. 6 Correlationship of electrical conductivity with soil NO₃⁻-N

由于大棚菜地高量的化肥与有机肥投入,导致了养分在土壤中的大量残留与累积。0~30cm的表层土壤有机质含量为一般农田的1.3倍,土壤全氮含量为农田的1.4倍。0~90cm土层土壤硝态氮累积量为农田的5.6倍,铵态氮为1.8倍,土壤速效磷(Olsen-P)为8.4倍,土壤速效钾为2.2倍。就累积的养分形态而言,大棚菜地以速效磷和硝态氮累积程度较高,这和王朝辉等的研究结果相类似^[22]。洛桑试验站的研究结果认为^[23],土壤Olsen-P高于60mg/kg即可导致磷在排水中浓度急剧增加至2mg/L以上,而大棚蔬菜土壤Olsen-P远远高于这个数值。土壤中高累积磷对水体的影响应做进一步深入的研究。土壤累积的无机氮主要为硝态氮,这种高量累积的NO₃⁻-N在降雨和灌水条件下势必引起NO₃⁻-N的大量淋洗^[8],Yadav的研究结果表明,每年分别有68%和20%残留在非根层和根层土壤的NO₃⁻-N进入地下水^[24]。山东省惠民县20世纪80年代初期农户开始零星种植大棚蔬菜,20世纪90年代初有了大面积发展,至2000年仅淄角镇大棚蔬菜面积已达耕地面积的6.7%。改种为大棚蔬菜的表层(0~30cm)土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾分别为改种前土壤^[25]的1.8、2.1、23.0和1.3倍,而同期小麦-玉米田土壤耕层养分分别为原来的1.4、1.5、2.9和0.5倍。对因种植结构调整带来的养分投入增加的环境效应引起足够重视。

大棚蔬菜长期大量施肥,且每年灌水多在10余次,每次灌水量达70mm以上,因而,周年灌水量常达900mm以上,造成N、P、K养分的大量淋溶。从不同土层深度养分的分布来看,大棚菜地0~90cm各层土壤的硝态氮、速效磷以及速效钾含量均显著高于农田,说明大棚菜地土壤中,不仅易于淋溶的硝态氮,而且移动性较差的P、K养分都能被淋洗并累积到较深的层次。对大棚番茄收获后1.4m深处土壤渗水NO₃⁻-N含量测定值为120~210mg N/L,平均含量171 mg N/L(8点平均)。小麦-玉米轮作农田不同层次也有较高的NO₃⁻-N累积,这与当地小麦-玉米施肥量高及施肥后大量以黄河水漫灌有关。据调查表明,当地小麦-玉米氮肥用量达606kg N/(hm²·a),其中底肥仅占约20%,返青期追肥约70%,主要采用尿素或碳铵撒施后结合黄河水漫灌的方式,灌水量则高达120mm。由于当地地下水位较浅(常年地下水位2m左右),有相当一部分氮素以硝酸盐形式淋溶至地下水。

玉米收获时测定的1.4m深处土壤下渗水的NO₃⁻-N浓度达12~39mg N/L,均高于WHO和EU饮用水硝态氮含量标准11.3mg/

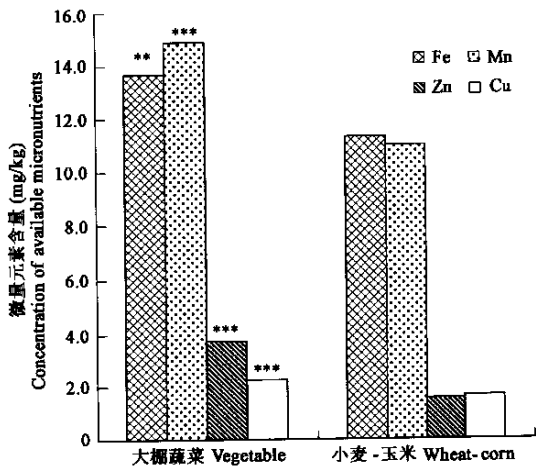


图7 两种体系表层土壤微量元素含量

Fig. 7 Concentration of micronutrients in 0~30 cm soil layer

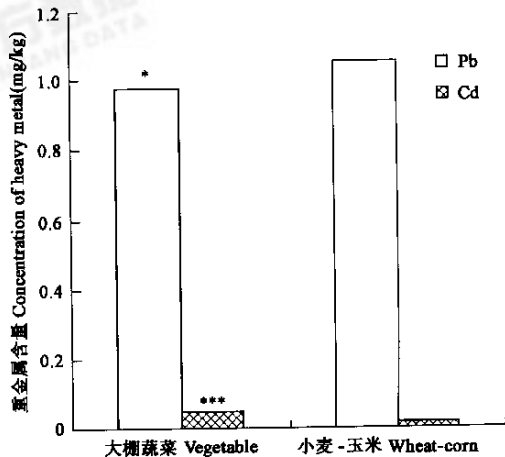


图8 两种种植体系土壤重金属含量

Fig. 8 Concentration of heavy metal in 0~30 cm soil layer

L^[26,27]。这个结果与 Cambardella 等^[28]在玉米上测定的土壤排水硝态氮含量结果类似,但在含量上要高于 Cambardella 等的结果,而与 Ng 等^[29]测定的渗水硝态氮含量 19.2mg N/L 接近。Stites 和 Kraft 曾报道,菜地土壤渗入地下水的 NO₃⁻-N 达 228 kg N/hm²^[30,31],由此导致菜地地下水上部 3m 蓄水层硝态氮含量比其紧邻上游农田地下水硝态氮高 20 倍^[32]。

大棚蔬菜有机肥用量较大,因而菜地土壤微量元素含量明显增加,研究表明 0~30cm 土层土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量分别为农田的 1.2、1.3、1.3 和 1.4 倍。就目前情况来看,仍在作物适宜生长范围之内,有利于对蔬菜作物微量元素的供应,不足以产生对作物的毒害。

大棚菜地土壤镉含量为农田的 2.8 倍。化肥、有机肥和大气沉降是土壤镉来源的重要途径,许多农业土壤镉含量正在缓慢增加^[33]。土壤镉含量与土壤速效磷呈显著正相关,说明施用磷肥造成的磷积累与重金属镉的积累有关。这个结果与 Williams 和 Davia 的结果相吻合,他们发现连续 5 年施用磷肥后土壤镉含量(8~28μg/kg)和小麦籽粒镉含量(30~60μg/kg)均与施磷量(0~60 kg P/(hm²·a))呈正线性关系^[34]。据对大棚施肥种类调查表明,在所施磷肥中二铵占 50% 以上,这其中又以进口二铵(美国和摩洛哥二铵)为主,美国产二铵含镉 8~105mg/kg,摩洛哥产二铵含镉 9.4~22.9mg/kg^[35],显著高于中国产磷肥,是大棚蔬菜土壤镉主要的来源。需要说明的是,尽管大棚土壤镉含量有较大增长,但仍低于 0.05 mg/kg,在 30 个大棚中仅有 4 个含量达到 0.1mg/kg,远低于我国土壤镉含量基准值(0.3mg/kg)和警戒值(0.5mg/kg),仍处于较为理想的含镉水平(<0.15mg/kg)^[36]。重金属铅不同于镉,以小麦-玉米地为高,平均为大棚土壤的 1.1 倍,其原因有待研究。但二者均在 1mg/kg 左右,不至于对土壤环境和农产品品质造成影响。

大棚菜地不同土层土壤 pH 明显低于小麦-玉米轮作农田,且随土壤深度的增加而增加,而小麦-玉米田各层土壤 pH 没有显著差异,说明大棚土壤表层酸化更为严重。土壤各层 pH 均与硝态氮含量呈幂函数降低关系,而且随土壤深度的增加其相关程度降低,这说明是由于大棚蔬菜长期大量施用化肥尤其是氮肥,其在微生物的硝化作用下形成硝态氮而诱导土壤酸化,在 Stamatiadis 等的研究中 pH 甚至下降了 1.4 个单位^[37]。有研究^[38]表明,土壤 pH 与硝酸盐含量呈负相关,与本文结果相似。

大棚蔬菜长期大量施用化肥的另一后果是土壤养分积累量过高所导致的不同程度的土壤次生盐渍化,从而成为蔬菜生长的重要障碍因素。研究结果显示,除 60~90cm 层次两体系间土壤电导率无显著差异外,0~30cm、30~60cm 两层大棚菜地土壤电导率分别为农田的 2.4 和 1.4 倍。电导率反映着土壤中盐分累积情况和盐渍化的程度,一般当土壤中累积盐分 3000~6000mg/kg 时,大多数栽培植物受盐害影响而生长困难,盐渍化土壤的电导率临界指标为 0.9ms/cm^[39],从这一点来看,大棚蔬菜土壤尽管存在次生盐渍化的趋势,但尚未达到盐渍化土壤的程度,在 30 个大棚中仅有 2 个大棚 0~30cm 土层超过此值。

大棚菜地土壤盐分组成中,硝酸根离子占阴离子总量的 67%~76%^[16,40],因而,土壤盐分的累积与硝酸根离子的累积有极大的关系,具体表现在其与电导率的关系上。研究表明,各层土壤的电导率均与土壤硝态氮含量呈极显著正相关,大棚土壤因累积较多的硝态氮,因而电导率也较高,尤以表层为甚,小麦-玉米轮作农田则相反。Patriquin 等^[38]和 Smith 与 Doran^[41]也得出类似结论,因而有人提出以测定电导率来估测土壤硝态氮含量并作为土壤溶解性养分的指标^[41,42],甚至用于监测土壤有机质的矿化^[43]。

大棚蔬菜长期大量施用化肥加之频繁的大量灌水使土壤养分尤其是硝态氮累积与淋洗严重,而菜类作物属浅根系作物,根系主要集中在表层 0~40cm 土壤^[44],因而被淋洗至 40cm 以下的养分很难再被作物吸收利用,并随着连年的施用、累积与淋洗成为菜区地下水污染的潜在因子^[45]。长期大量施用化肥还使土壤趋于酸化和发生次生盐渍化,成为制约蔬菜正常生长的障碍因素。因而大棚蔬菜水肥管理是蔬菜生产管理的关键,应根据不同的蔬菜种类,针对蔬菜的需肥特性和土壤肥力水平,注重 N、P、K 的平衡施用和养分收支平衡,并配以合理灌水,以减少大棚蔬菜生产体系对环境的压力。

References:

- [1] Matson P A, Parton W J, Power A G, *et al.* Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 1997, **277**:504~509.
- [2] Li T X, Zhang X Z, Wang C Q, *et al.* Progress in the study on soil salinization of protected farmland. *Southwest China J. of Agricul*, 2001, **14**(s):103~107.
- [3] Jia J W, Li W Q, Chen B C. Nutrient status and fertilization of protected vegetable soils in Shandong Province. In: Xie J C and Chen J

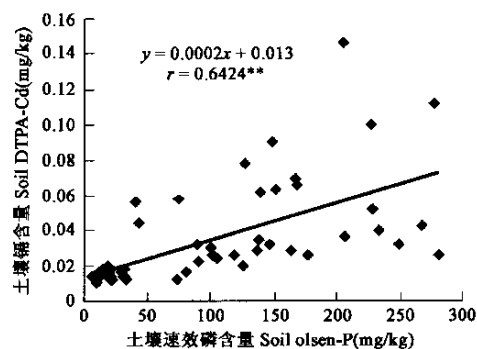


图9 土壤 DTPA-Cd 与速效磷的相关性

Fig. 9 Correlationship of DTPA-Cd with Olsen-P in 0~30cm soil layer

X ed. Vegetable Soil Fertility and Rational Fertilization. Nanjing: Hehai University Press, 1997. 73~75.

- [4] Shen M Z, Zhai B J, Dong H R, *et al.* Studies on nitrate accumulation in vegetable crops I. Evaluation of nitrate and nitrite in different vegetables. *Hort. Sin.*, 1982, **9**(4):41~48.
- [5] Wu F Z, Liu D, Wang D K, *et al.* Effect of continuous vegetable cropping in plastic greenhouse on the soil physicochemical properties. *China Vegetable*, 1998, (4):5~8.
- [6] Richter J and Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-example from central Europe and China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **57**:33~46.
- [7] Neeteson J J. The risk of nitrate leaching after application of nitrogen fertilizers to agricultural crops. In: D. C. Adriano eds. *Advances in Environmental Science*. Groundwater Series, Springer, New York, 1992.
- [8] Pioke H B, Sharma M L and Hirschberg K J. Impact of irrigated horticulture on nitrate concentrations in groundwater. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1990, **32**:119~132.
- [9] Jebson M. "Typical" Arable Farm Management Practices. www.maf.govt.nz9, 2002/7/15.
- [10] Ramos C, Agut A, Lidón A L. Nitrate leaching in important crops of the Valencian Community region (Spain) *Environmental Pollution*, 2002, **118**:215~223.
- [11] Lü D Q, Tong Y A, Sun B H, *et al.* Effect of application of N fertilizer on environment. *Plant Nutr. Fertil. Sci.*, 1998, **4**(2):8~15
- [12] Powlson D S. Integrating agricultural nutrient management with environmental objective-Current state and future prospects. *The Fertilizer Society, Proceedings*, 1997. 402.
- [13] Sharpley A N, Menzel R G. The impact of soil and fertilizer on the environment. *Advan. Agron.*, 1987, **41**:297~320.
- [14] Song F, Guo Y W, Liu X Y, *et al.* Pollution of cadmium, zinc and lead in brown earth. *Acta Sci. Circ.*, 1996, **16**(4):431~436.
- [15] Jinadasa K B P, Milham P J, and Hawkins C A, *et al.* Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. *J. Environ. Qual.*, 1997, **26**:924~933.
- [16] Xue J C, Bi D Y, Li J J, *et al.* The adverse physiological factors of soil in the protective ground cultivation of vegetable and counter measurements. *Soil and Fertilizer*, 1994, (1):4~9.
- [17] He P A, Li R, eds. *Records of Nutrients in Organic Fertilizer in China*. China Agricultural Press, 1999.
- [18] He Q W, Chen Y Q, Jiao Z G, *et al.* Study on systematic techniques for vegetables in new type solar greenhouses of Shandong (II). *Shandong Agricultural Sciences*, 2000, (6):13~15.
- [19] Ma W Q. Current status and evaluation of crop fertilization in Shandong Province. Ph. D. Thesis. China Agricultural University, Beijing, China, 1999.
- [20] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment*, 2003, **311**:205~219.
- [21] Kockova E, Palat M, and Betusova M. Bioelements and heavy metals in dry and wet depositions at some localities in the Morava River basin. *Wat. Sci. Tech.*, 1996, **33**:277~283.
- [22] Wang Z H, Zong Z Q, Li S X. Differences of several nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils. *Chinese J. of Applied Ecology*, 2002, **13**(9): 1091~1094.
- [23] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different P concentration in the Broadbalk Experiment. *J. Environ. Qual.*, 1995, **24**:904~910.
- [24] Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation. *J. Environ. Qual.*, 1997, **26**:808~814.
- [25] Office for the second soil survey of Huimin county, Shandong Province. Soil records of Huimin county, 1985.
- [26] WHO. *Guidelines for Drinking Water Quality*, 2edn. 1:Recommendations. WHO, Geneva, 1993.
- [27] EU. Council Directive 98/83/EC of November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal L 330, 05/12/1998. 32~54.
- [28] Cambardella C A, Moorman T B, Jaynes D B, *et al.* Water quality in Walnut creek watershed: Nitrate-nitrogen in soils, subsurface drainage water, and shallow groundwater. *J. Environ. Qual.*, 1999, **28**:25~34.
- [29] Ng H Y F, Tan CS, Drury C F, *et al.* Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, **90**: 81~88.
- [30] Stites W and Kraft G J. Nitrate and chloride loading to groundwater from an irrigated north-central U. S. sand plain vegetable fields. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**:1176~1184.
- [31] Kraft G J and Stites W. Nitrate impacts on groundwater from an irrigated-vegetable systems in a humid north-central US sand plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, **100**:63~74.

[32] Stites W and Kraft G J. Groundwater quality beneath irrigated vegetable fields in a north-central U.S. sand plain. *J. Environ. Qual.* , 2000,**29**: 1509~1517.

[33] McLaughlina M J, Parkerb D R, Clarke J M. Metals and micronutrients-food safety issues. *Field Crops Research*,1999,**60**:143~163.

[34] Williams C H and David D J. The accumulation of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the content of plants. *Soil Science* , 1976, **121**:86~93.

[35] WANG J P. Cd level in high-analysis phosphate fertilizer after WTO accession. *Phosphate &.Compound Fertilizer*, 2002,**17**:11~15.

[36] WANG Y, WEI F S, eds. Chemistry of Soil Environmental Elements. Biejing: China Press of Environmental Sciences, 1995.

[37] Stamatiadis S, Werner M, Buchanan M. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, 1999, **12**:217~225.

[38] Patriquin D G, Blaikie H, Patriquin M J, *et al.* On-farm measurement of pH, electrical conductivity and nitrate in soil extracts for monitoring coupling and decoupling of nutrient cycles. *Biological Agriculture and Horticulture*, 1993, **9**:231~272.

[39] Daniels M B, Chapman S L, Teague W. Utilizing spatial technology as a decision-assist tool for precision grading of sal-affected soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **57**:134~143.

[40] Xue J C, Wu Z H, Li J J, *et al.* Study on application of nitrogen fertilizer in greenhouse culture. *China Vegetable*, 1994, (5):22~25.

[41] Smith J L, Doran J W. Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In: Doran, J. W. , Jones, A. J. Eds. *Methods for Assessing Soil Quality, Soil Sci. Soc. Am.* Special Publication 49. SSSA, Madison, WI. , 1996.

[42] Eigenberg R A, Doran J W, Nienaber J A, *et al.* Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2002, **88**:183~193.

[43] De Neve S, Van De Steene J, Hartman R, *et al.* Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. *Eu. J. Soil Sci.* ,2000, **51**:295~304.

[44] Zhuang S Y, Sun X T. The fate and budget of nitrogen fertilizer in vegetable soil. *Soils*, 1997,(2):80~83.

[45] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* , 1996, **59**: 223~231

参考文献:

[2] 李廷轩, 张锡洲, 王昌全,等. 保护地土壤次生盐渍化的研究进展. 西南农业学报, 2001,**14**(增刊):103~107.

[3] 贾继文,李文庆,陈宝成,等. 山东省蔬菜大棚土壤养分状况与施肥现状的调查研究. 见:谢建昌,陈际型主编. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥. 南京:河海大学出版社,1997. 73~75.

[4] 沈明珠,翟宝杰,东惠茹,等. 蔬菜硝酸盐累积的研究 I. 不同蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐含量评价. 园艺学报, 1982,**9**(4):41~48.

[5] 吴凤芝,刘德,王东凯,等. 大棚蔬菜连作年限对土壤主要理化性状的影响. 中国蔬菜,1998,(4):5~8.

[11] 吕殿青,同延安,孙本华,等. 氮肥施用对环境污染影响的研究. 植物营养与肥料学报,1998,**4**(1):8~15.

[14] 宋菲,郭玉文,刘孝义,等. 土壤中重金属镉铅锌复合污染的研究. 环境科学学报,1996,**16**(4):431~436.

[16] 薛继澄,毕德义,李家金,等. 保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策. 土壤肥料,1994,(1):4~9.

[17] 何平安,李荣,编著. 中国有机肥料养分志. 北京:中国农业出版社, 1999.

[18] 何启伟,陈运起,焦自高,等. 山东新型日光温室蔬菜系统技术研究(Ⅱ). 山东农业科学,2000,(6):13~15.

[19] 马文奇. 山东省作物施肥现状及评价. 中国农业大学博士学位论文,1999.

[22] 王朝辉,宗志强,李生秀. 菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异. 应用生态学报,2002,**13**(9):1091~1094.

[25] 惠民县土壤志. 山东省惠民县第二次土壤普查办公室, 1985.

[35] 王江平. 入世后高浓度磷肥中镉的问题. 磷肥与复肥,2002,**17**:11~15.

[36] 王云,魏盛盛,等编著. 土壤环境元素化学. 北京:中国环境科学出版社,1995.

[40] 薛继澄,吴志行,李家金,等. 设施栽培土壤氮肥施用问题的研究. 中国蔬菜,1994,(5):22~25.

[44] 庄舜尧,孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡. 土壤,1997,(2):80~83.