

# 太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水水质调查<sup>①</sup>

闵 炬, 陆扣萍, 陆玉芳, 卢伟伟, 周影茹, 孙海军, 邢光熹, 施卫明\*, 朱兆良

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 为了解和评价太湖地区大棚菜地土壤肥力及其周边地下水硝酸盐和氨氮含量状况, 以直湖港小流域为研究区域, 采集大棚和露天菜地土样 192 和 54 个, 浅层地下水样 26 和 10 个, 分析土壤速效养分、全氮和有机质含量, 土壤 pH 和 EC 值, 地下水硝酸盐和氨氮含量。结果表明, 直湖港小流域大棚菜地耕层土壤速效氮含量为 279 mg/kg, 是露天菜地的 2.6 倍。大棚菜地耕层土壤速效磷、钾含量分别为 188 mg/kg 和 203 mg/kg, 与露天菜地无显著差异。大棚菜地耕层土壤速效氮磷钾含量均高于全国第二次土壤普查分级的最高标准, 且氮磷钾养分表聚严重。耕层土壤有机质含量偏低为 13 g/kg; 大棚菜地耕层土壤 pH 值为 5.6 呈弱酸性, 37% 的该区大棚菜地种植面积土壤 pH 值低于作物生理障碍的临界值, 该区 16.4% 的大棚蔬菜种植面积土壤 EC 值超过作物生育障碍临界值。参照我国生活饮用水卫生标准评价, 结果表明, 直湖港小流域大棚菜地周边浅层地下水硝酸盐超标率为 35%, 氨氮超标率为 8%。

**关键词:** 集约化蔬菜种植; 面源污染; 土壤肥力; 硝酸盐; 氨氮

**中图分类号:** S158.3; X523

太湖处于长江三角洲南部, 流域总面积 36 500 km<sup>2</sup>, 太湖水系分入湖、出湖两系统。河道污染物输入是太湖主要的外源污染<sup>[1]</sup>。直湖港地区为入太湖小流域, 水质长期处于V~劣V类, 对太湖水质影响较大。是江苏省重点整治的入湖河道。2007年直湖港地区人口 39.9 万人, 种植面积 0.73 万 hm<sup>2</sup>, 其中旱地 0.45 万 hm<sup>2</sup>、水田 0.27 万 hm<sup>2</sup>[2]。直湖港小流域分布着较多的集约化菜地, 近 5 年来该区大棚蔬菜种植面积达 133 hm<sup>2</sup> 左右, 主要是由原来的稻田改种而来, 因为土地利用方式和施肥制度的根本性变化, 其土壤养分状况及对地下水水质的影响在理论上应该发生了很大的变化, 但是, 由于缺乏基础研究, 对于这些变化的程度和现状并不明了和掌握。由于直湖港为入太湖的小流域水网地区, 大棚蔬菜地的分布区大多靠近河道水体, 氮、磷污染物从菜地输移进入水体的路途较短, 使得大棚蔬菜地成为该地区重要的面源污染来源之一。因此, 有必要针对该地区大棚菜地土壤养分的现状开展调研。本研究于 2009 年全面调查了直湖港小流域大棚菜地土壤养分状况, 大棚菜地周边地区地下水水质包括硝酸盐和氨氮含量状况, 为该地区合理施肥提供依据, 同时为直湖港水环境综合整治, 提高太

湖的水环境质量也具有积极的参考意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 土样采集

调查取样涉及直湖港小流域大棚菜地面积 133 hm<sup>2</sup>, 露天菜地面积 34 hm<sup>2</sup>。分别采集大棚和露天菜地耕层土样 64 和 18 个, 平均每个土样分别代表面积 2.1 和 1.9 hm<sup>2</sup>。在采样前, 根据土地利用方式和行政单元将采样区域划分为若干个采样单元, 每个采样单元的土壤性状尽可能均匀一致。集中在每个采样单元相对中心位置的典型地块采样, 采用 GPS 定位。按照随机、等量 and 多点混合的原则, 采用“S”形布点, 每个样品取 6 个样点混合, 取样深度为 0~20, 30~40, 60~80 cm。因此, 共采集大棚和露天菜地土样 192 和 54 个。

### 1.2 样品分析方法

供试土壤测定理化指标包括有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾。其中有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。全氮用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 自动定氮仪 (BÜCHI 399) 测定。硝态氮和铵态氮采用 1 mol/L KCl 溶液浸提新鲜土样, 连续流动分析仪 (Holland, Skalar Corp) 测定浸提液。速效磷采用 0.5

①基金项目: 国家科技重大专项“水体污染控制与治理”湖泊主题太湖项目(2008ZX07101-005)资助。

\* 通讯作者 (wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 闵炬(1982—), 女, 新疆和硕人, 博士, 助理研究员, 主要从事蔬菜氮素营养与环境效应的研究。E-mail: jmin@issas.ac.cn

mol/L 的  $\text{NaHCO}_3$  浸提-钼锑抗比色法测定。速效钾采用 1 mol/L 的  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提-火焰分光光度法测定。pH 值采用水土比为 2.5:1, pH 计 (Italy, Hanna) 测定。电导率 (EC) 采用水土比为 5:1, DDS-11A 型电导仪测定。

同时, 分别采集分布于大棚菜地和露天菜地周围浅井水样品 26 和 10 个。水样硝酸盐含量用紫外分光光度法进行测定, 氨氮含量用苯酚-次氯酸盐比色法测定。

### 1.3 土壤养分分级标准

依据全国第二次土壤普查各项土壤养分指标的等级范围分级标准 (表 1), 对直湖港地区菜地的土壤肥力状况进行分析。

表 1 全国第二次土壤普查分级标准

Table 1 The classification standards of soil fertility posed by the 2<sup>nd</sup> National Soil Survey

分级	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	矿质氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
很丰富	>40	>20	>150	>40	>200
丰富	30~40	15~20	120~150	20~40	150~200
最适宜	20~30	10~15	90~120	10~20	100~150
适宜	10~20	7.5~10	60~90	5~10	50~100
缺乏	6~10	5~7.5	30~60	3~5	30~50
很缺乏	<6	<5	<30	<3	<30

地下水硝酸盐和氨氮含量分析综合参照我国地下水水质标准 (GB/T14848-93), 将地下水水质分为 5 类。生活饮用水卫生标准 (GB5749-2006), 即我国生活饮用水卫生标准限定饮用地下水硝酸盐含量不得超过 10 mg/L; 氨氮含量不得超过 0.5 mg/L。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分调查结果

2.1.1 土壤矿质氮 土壤矿质氮是可以直接被蔬菜根系吸收的氮。从调查的 246 个土样来看, 直湖港小流域大棚菜地耕层土壤矿质氮含量在 76 ~ 612 mg/kg 之间。耕层以下土壤即 30 ~ 40 cm 和 60 ~ 80 cm 土壤矿质氮含量较低, 最高含量不超过 75 mg/kg。大棚菜地矿质氮含量平均值比露天菜地高 173 mg/kg。露天菜地耕层以下土壤中矿质氮含量也较低, 最高值不超过 44 mg/kg。从两种类型菜地土壤矿质氮含量的调查结果可以看出, 矿质氮主要在耕层土壤累积, 且大棚菜地高于露天菜地约 2.6 倍 (表 2)。

表 2 直湖港小流域菜地土壤矿质氮含量

Table 2 Soil mineral nitrogen contents of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0~20	76~612	279.2	151.8	54
	30~40	12~70	32.2	23.0	71
	60~80	8~75	27.2	19.1	70
露天	0~20	32~416	106.7	73.9	69
	30~40	13.7~43.6	24.8	16.1	65
	60~80	9~11	10.1	0.8	8

将矿质氮含量的调查结果与全国第二次土壤普查分级标准 (表 1) 相对照可知, 直湖港地区大棚菜地耕层土样中有 76% 达到“适宜”及以上标准, 而露天菜地土样中仅 34% 达到这一标准。其中大棚菜地耕层中达“很丰富”、“丰富”、“最适宜”标准的土样是露天菜地的 2.4, 3.7 和 2.8 倍。

2.1.2 土壤速效磷和速效钾 土壤速效磷可对作物直接起作用, 它常常被看作是土壤供磷能力的一个重要指标, 对指导施肥具有重要意义。数据统计结果表明 (表 3), 大棚和露天菜地耕作层土壤速效磷含量平均值分别为 188 和 183 mg/kg。一般情况下, 速效磷含量超过 20 mg/kg 则表明土壤速效磷达到较为丰富的程度。超过速效磷含量最高标准的, 在大棚和露天菜地种植面积中占 96.7% 和 87.5%, 耕层土壤速效磷含量是耕层以下的 6~12 倍, 表明直湖港小流域大棚和露天菜地土壤速效磷含量普遍较高且在耕层大量累积。

表 3 直湖港小流域菜地土壤速效磷含量

Table 3 Soil olsen-P contents of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0~20	35~378	188	112	59.7
	30~40	11~75	33	20.7	62.7
	60~80	11~23	16	4.6	28.8
露天	0~20	33~388	183	116	63.3
	30~40	15~41	31	11.0	35.5
	60~80	13~19	16	2.5	15.6

速效钾含量是土壤供钾能力的重要指征。分析结果可以看出 (表 4), 大棚和露天菜地耕层土壤速效钾含量均值均高出 200 mg/kg 这一最高分级标准 (表 1)。耕层土壤速效钾含量大于 200 mg/kg 的大棚和露

天蔬菜种植面积分别占 44.3% 和 50.1%，速效钾含量在 150 ~ 200 mg/kg 之间的大棚和露天蔬菜种植面积分别占 68.9% 和 75.0%，耕层土壤速效钾含量是耕层以下的 2 ~ 3 倍，表明直湖港小流域大棚和露天菜地土壤速效钾含量普遍较高且在耕层大量累积。

表 4 直湖港小流域菜地土壤速效钾含量  
Table 4 Soil exchangeable-K contents of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0 ~ 20	78 ~ 475	203	87.7	43.2
	30 ~ 40	52 ~ 122	92	22.3	24.2
	60 ~ 80	41 ~ 109	80	24.1	30.1
露天	0 ~ 20	99 ~ 330	224	78.6	35.1
	30 ~ 40	90 ~ 206	120	45.6	38.0
	60 ~ 80	63 ~ 145	112	34.9	31.2

2.1.3 土壤有机质和全氮 土壤有机质是衡量土壤肥力的重要标志之一<sup>[3]</sup>，直湖港小流域蔬菜种植区，无论大棚还是露天菜地土壤有机质含量偏低（表 5），平均含量为土壤分级的缺乏水平（表 1）。结合表 1 和表 6，从大棚和露天菜地耕层土壤全氮含量的均值可以看出，均在适宜水平，耕层以下土壤全氮含量均很缺乏。

2.2 土壤理化性质调查结果

2.2.1 土壤 pH 值 根据分析结果（表 7），直湖港小流域菜地土壤 pH 值呈弱酸性。保证土壤有机氮充分利用的适宜土壤 pH 值为 6.5 ~ 7.9 之间<sup>[4]</sup>。蔬菜出现生理障碍的临界土壤 pH 值为 5.52<sup>[5]</sup>。耕层土壤 pH 值已临近蔬菜出现生理障碍的临界值，其中分别有 36.1% 和 37.5% 的大棚和露天蔬菜种植面积已超出这一临界值。

表 5 直湖港小流域菜地土壤有机质含量  
Table 5 Soil organic matter contents of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (g/kg)	平均值 (g/kg)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0 ~ 20	8 ~ 12	9	2.2	24.4
	30 ~ 40	7 ~ 11	7	2.7	38.6
	60 ~ 80	4 ~ 6	4	1.2	30.0
露天	0 ~ 20	6 ~ 12	10	2.8	28.0
	30 ~ 40	4 ~ 12	8	2.3	28.8
	60 ~ 80	2 ~ 6	5	1.2	24.0

表 6 直湖港小流域菜地土壤全氮含量  
Table 6 Soil total nitrogen contents of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (g/kg)	平均值 (g/kg)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0 ~ 20	1 ~ 13	9	0.3	33.3
	30 ~ 40	1 ~ 5	3	0.1	33.3
	60 ~ 80	2 ~ 9	4	0.3	75.0
露天	0 ~ 20	2 ~ 12	8	0.3	37.5
	30 ~ 40	2 ~ 6	4	0.2	50.0
	60 ~ 80	1 ~ 8	5	0.3	60.0

表 7 直湖港小流域菜地土壤 pH 值  
Table 7 Soil pH values of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅	平均值	标准差	变异系数 (%)
大棚	0 ~ 20	4.5 ~ 6.7	5.63	0.43	7.6
	30 ~ 40	6.2 ~ 7.1	6.74	0.37	5.5
	60 ~ 80	6.8 ~ 7.3	7.11	0.19	2.7
露天	0 ~ 20	4.7 ~ 6.4	5.55	0.47	8.5
	30 ~ 40	5.8 ~ 7.2	6.47	0.47	7.3
	60 ~ 80	6.6 ~ 7.1	6.75	0.21	3.1

2.2.2 土壤 EC 值 土壤 EC 值可用来测量土壤溶液中可溶性盐浓度。高浓度的可溶性盐类会使植物受到损伤或造成植株根系的死亡。土壤 EC 值 > 0.50 mS/cm 是作物生育障碍临界点<sup>[6]</sup>。分析结果（表 8），大棚菜地耕层土壤 EC 值变幅在 0.1 ~ 0.9 之间，其中 16.4% 的种植面积土壤 EC 值超出这一临界值，然而露天菜地无此现象。表明直湖港小流域大棚菜地存在土壤次生盐渍化现象。

表 8 直湖港小流域菜地土壤 EC 值  
Table 8 Soil EC values of vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	土层 (cm)	变幅 (mS/cm)	平均值 (mS/cm)	标准差	变异系数 (%)
大棚	0 ~ 20	0.1 ~ 0.9	0.30	0.19	63.9
	30 ~ 40	0.1 ~ 0.3	0.16	0.06	37.9
	60 ~ 80	0.1 ~ 0.2	0.10	0.03	29.2
露天	0 ~ 20	0.1 ~ 0.4	0.23	0.13	57.6
	30 ~ 40	0.08 ~ 0.14	0.13	0.02	15.9
	60 ~ 80	0.08 ~ 0.12	0.10	0.02	19.7

2.3 菜地周边浅层地下水硝酸盐含量

从调查结果可以看出（表 9），直湖港小流域大棚菜地周边浅层地下水硝酸盐含量平均值为 10.2 mg/L。参照我国饮用地下水硝酸盐含量标准（10 mg/L）（GB5749-2006）可以看出，该地区地下水硝酸盐平均

含量略高于标准, 在 26 个水样中有 9 个超过此标准, 水样超标率达 35%。若参照我国饮用地下水氨氮含量标准 (0.5 mg/L) (GB5749-2006) 可以看出, 该区浅层地下水氨氮含量平均值已超过安全标准, 水样超标率为 8%。然而, 直湖港小流域露天菜地周边浅层地下水硝酸盐和氨氮含量平均值分别为 6.3 和 0.4 mg/L, 均分别低于我国饮用地下水硝酸盐和氨氮含量标准。

表 9 直湖港小流域菜地周边地下水硝酸盐和氨氮含量

Table 9 Nitrate and ammonia contents of ground water around vegetable fields in watershed of Zhihu harbor

菜地类型	项目	变幅 (mg/L)	平均值 (mg/L)	标准差	变异系数 (%)
大棚	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.8 ~ 35.0	10.2	11.2	110
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.1 ~ 10.4	0.8	2.0	250
露天	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.9 ~ 9.6	6.3	3.1	49.2
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.1 ~ 1.1	0.4	0.5	150

### 3 结论与讨论

直湖港小流域大棚和露天菜地耕层土壤速效氮磷钾含量的分析结果变异系数分别在 54% ~ 69%、60% ~ 63% 和 35% ~ 43% 之间。该区种植的蔬菜种类较多, 主要有番茄、黄瓜、茼蒿、芹菜、小青菜、西瓜、空心菜等。不同蔬菜品种生长时期, 需肥量不尽相同, 施肥对耕层土壤的养分含量影响显著, 使得土壤样品的分析结果变异较大。

调查结果表明直湖港小流域大棚菜地耕层土壤速效氮磷钾含量均高于全国第二次土壤普查分级的最高标准 (表 1、2、3、4), 表明该区大棚菜地节氮控磷潜力较大。另外, 调查中发现大棚菜地土壤氮磷钾养分表聚严重, 该区每年种植蔬菜 3 ~ 4 季, 每年氮投入量高达 1 200 ~ 1 400 kg/hm<sup>2</sup>, 远远超过面源污染控制的施肥标准。直湖港小流域位于入太湖流域的水网地区, 菜地氮磷污染物输移进入水体的路途较短, 南方降雨多等因素使得菜地氮磷通过径流等方式进入河道, 对其周边水体的氮磷污染风险增大。

对该区大棚菜地周边浅层地下水水质调查结果表明, 地下水硝酸盐超标率达 35%, 氨氮超标率为 8% (表 9), 这与 Shi 等<sup>[3]</sup>调查的结果相似, Shi 等调查了江苏宜兴地区大棚周边地下水硝酸盐含量, 其超标率为 32%。由于大棚蔬菜复种指数高, 且蔬菜又是需肥、需水量大的作物<sup>[7]</sup>, 频繁的灌水势必导致累积在土壤耕层的氮素随水淋洗到土壤下层, 出现浅层地下

水污染的趋势。本研究调查的是浅层地下水, 地下水位为 0.8 ~ 1 m, 虽然大棚耕层土壤速效氮含量高于耕层以下土壤, 但可能由于较高的耕层土壤氮含量, 经长久频繁的淋洗使耕层的氮流失到浅层地下水中。然而该地区露天菜地周边浅层地下水未超标, 可能由于露天菜地耕层土壤低的氮含量未使其污染到周边浅层井水。

该区大棚菜地耕层土壤速效氮含量高于露天菜地 2.6 倍左右 (表 2), 其耕层土壤速效磷钾含量与露天菜地无差异 (表 3、4)。调查中发现, 该地区大棚菜地的施氮量是露天菜地的 2 ~ 3 倍, 大棚菜地可反季节生产, 复种指数高等, 为追求高产往往施氮量较露天菜地高, 加之大棚缺少雨水淋洗, 其土壤易发生次生盐渍化现象, 土壤 EC 值和土壤酸化与土壤硝态氮的含量呈显著正相关关系<sup>[3]</sup>, 化肥的大量施用使得土壤出现酸化的趋势<sup>[8-10]</sup>。大棚土壤酸化与土壤的次生盐渍化是限制大棚蔬菜地生产可持续发展的重要因素。调查结果也表明该区土壤有机质含量偏低, 通过多施有机肥或者秸秆还田可提升菜地土壤有机质含量。

### 参考文献:

- [1] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉. 中国湖泊环境 (第二册). 北京: 海洋出版社, 1995
- [2] 蒋咏, 孙淑云. 直湖港水环境综合治理探讨. 水资源管理, 2009, 23: 35-38
- [3] Shi WM, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *J. Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83: 73-84
- [4] 邹宗杰, 孙小凤, 邓义林. 农作物配方施肥技术. 西宁: 青海人民出版社, 1993
- [5] 潘玉荣, 刘艳英, 包丽红, 包桂霞, 吴艳杰. pH 值对菜地土壤中三要素肥料的影响. *土壤肥料*, 2006, 196(6): 22-23
- [6] 范庆锋, 张玉龙, 陈重, 王丽娜, 娄翼来. 保护地土壤盐分积累及其离子组成对土壤 pH 值的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 16-20
- [7] 闵炬, 施卫明, 王俊儒. 不同施氮水平对大棚蔬菜氮磷钾养分吸收及土壤养分含量的影响. *土壤*, 2008, 40(2): 226-231
- [8] Li WQ, Zhang MS, Van DZ. Salt contents in soils under plastic greenhouse gardening in China. *Pedosphere*, 2001, 11(4): 359-367
- [9] 余海英, 李延轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究. *土壤学报*, 2006, 43(4): 571-576
- [10] 郭文忠, 刘声锋, 李丁仁, 赵顺山. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望. *土壤*, 2004, 36(1): 25-29

## Investigation of Soil Fertility and Quality of Ground Water in Greenhouse Vegetable Fields of Tai Lake Region

MIN Ju, LU Kou-ping, LU Yu-fang, LU Wei-wei, ZHOU Ying-ru, SUN Hai-jun, XING Guang-xi, SHI Wei-ming, ZHU Zhao-liang  
(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** In order to find out and evaluate soil fertility and pollution status of nitrate and ammonia N in ground water in greenhouse vegetable fields of Tai Lake Region, 192 and 54 soil samples, 26 and 10 groundwater samples were collected from the greenhouse and no-covered field respectively in the watershed of Zhihu harbor, and then the contents of mineral N, olsen-P, exchangeable-K, total N, organic matter, the values of pH and EC of soil samples and the contents of nitrate N and ammonia N in the ground water were analyzed. The results revealed that the mineral N content was 279 mg/kg in greenhouse plow layer soil, which was 2.6 times of no-covered. The Olsen-P and exchangeable-K contents were 188 mg/kg and 203 mg/kg respectively in greenhouse plow layer soil, which showed no significant difference between greenhouse and no-covered vegetable fields. N, P and K were easily accumulated in the surface layer of the greenhouse vegetable fields. Organic matter content was 13 g/kg in plow layer soil, which was lower than the classification standard of soil fertility. pH value was 5.6 in greenhouse plow layer soil and 37% of the total cultivated area was below the critical value of the vegetable physiological barrier. 16.4% of the total cultivated area was above the critical value of the vegetable inbred EC barrier. According to the national sanitary standards in drinking groundwater, the exceeding standard rate of nitrate N and ammonia N reached 35% and 8% respectively.

**Key words:** Intensive vegetable cultivation, Non-point pollution, Soil fertility, Nitrate, Ammonia nitrogen