

黄淮海平原农区县域土壤养分平衡评价方法及其应用

齐伟^{1,2}, 徐艳², 张凤荣²

(¹ 山东农业大学土地资源管理系, 泰安 271018; ² 中国农业大学土地资源管理系, 北京 100094)

摘要: 人为因素控制下的农业土壤养分循环是建立可持续农业的物质基础, 研究土地利用系统养分平衡可以达到两个目标: 一是判断土壤肥力的变化趋势与速率; 二是判断农业对环境的影响。通过两种方法, 即土壤养分平衡宏观统计方法和GIS支持的土壤养分时空变化一体化评价方法, 对曲周县近20年的土壤氮、磷、钾变化趋势和时空分布进行了评价。两种方法都表明, 曲周县农业土壤氮、磷平衡有余, 而钾含量逐步减少, 并对对比该县地下水硝态氮的含量, 分析施肥对环境的影响, 发现土壤全氮的含量的增加与地下水硝态氮和含量有一定的相关性。

关键词: 土壤评价; 养分循环; GIS; 黄淮海平原

S15 A

Study on Evaluation Methods of Soil Nutrient Balance and Application at County Level in Huang-huai-hai Plain

QI Wei^{1,2}, XU Yan², ZHANG Feng-rong²

(¹Department of Land Resource Management, Shandong Agricultural University, Taian 271018;
²Department of Land Resource Management, China Agricultural University, Beijing 100094)

Abstract: Soil nutrient balance controlled by human factor is substance basis for sustainable agriculture, and two objects can be achieved through study on soil nutrient balance: to judge the tendency and rate of change of soil fertility; to judge the influence of agriculture on the entire environment. This paper studied on the evaluation of soil nutrient changing tendency and spatial-temporal distribution at county level in recently 20 years, soil nutrient balance macro-statistic method and soil nutrient spatial-temporal change evaluation method were studied. Both of the two kinds of methods indicated that nitrogen and phosphorus in soil were superabundant, but potassium decreased year by year. Some correlativity between the increased soil nitrogen and NO₃⁻-N content of groundwater was also found.

Key words: Evaluation of soil; Nutrient cycling; GIS; Huang-huai-hai plain

营养物质循环平衡作为农业生态系统的基本功能和主要过程, 是系统生产力和可持续性的决定因素, 同时对生物圈化学环境亦有重大影响, 人为因素控制下的农业养分循环是建立可持续农业的物质基础^[1~4]。我国主要农区正处于传统自给农业向现代集约农业转变过程中, 生态系统的开放度加大, 有效养分流及养分有效性过程加强; 同时, 也存在着养分流失加剧, 养分输入、流出失衡, 土壤养分大量进入水体和大气中, 造成局部环境养分的富集和污染^[2,3]。养分平衡的主要研究内容有土壤

施肥、养分矿化和收获产量、侵蚀、淋洗造成的养分损失, 以及过量施用化肥、厩肥所引起的环境负效应等。研究土地利用系统养分平衡可以达到两个目的, 一是判断土壤肥力的变化趋势与速率, 并深入了解农业生态系统养分循环特征, 提高人类在调控养分循环方面的自觉性, 使养分循环向有利于人类需要的方向发展; 二是判断农业对环境的影响, 在获得人类必需的粮食、蔬菜和纤维的同时, 所付出的生态成本最低^[7,8]。县域经济是我国经济的主体, 在县域尺度上有关生物自然和社会

收稿日期: 2003-01-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011810)和山东省博士后基金资助项目

作者简介: 齐伟(1970-), 男, 山东泰安人, 副教授, 博士, 主要从事可持续土地利用管理与地理信息方面的研究。E-mail: qiwei@sdau.edu.cn。张凤荣为通讯作者, E-mail: zhangfr@cau.edu.cn

经济方面的数据在系统边界上有着良好的重合性, 可以从两个方面来研究有关土地利用和可持续农业问题, 使研究成果可以更好地服务于地方经济发展和环境决策。

1 研究区背景

曲周县位于河北省南部, 黄淮海平原腹地, 地处东经 $114^{\circ} 50' 30'' \sim 115^{\circ} 13' 30''$, 北纬 $36^{\circ} 34' 45'' \sim 36^{\circ} 57' 57''$, 面积 676.7 km^2 。曲周县土壤均发育在近代河流冲积母质之上, 潮土面积占总面积的 95.96%。曲周县耕作历史悠久, 自然植被群落早已被农作物所取代, 少量盐荒地也曾不同程度垦殖过。农作物以粮、棉、油为主, 耕作制度灌溉农田以小麦-玉米为主, 少量麦棉套作; 旱地仅种植一季棉花或者小麦。曲周属于华北暖温带半湿润大陆性季风气候区, 多年平均气温 13.2°C 。无霜期平均 201 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $4\ 472^{\circ}\text{C}$ 。多年平均降水 534.7 mm , 所属的黑龙港流域是华北平原水资源最为缺乏的地区。全县分为 4 镇 6 乡, 342 个行政村, 曲周全县总人口 (1999 年) 383 702 人, 其中农业人口 362 150 人, 占 94.38%。曲周县土地利用率高, 已经达到 98.12%, 人均耕地 0.125 ha 。总之, 曲周县是个典型的农业县, 在华北平原具有代表性。

2 土壤养分循环平衡的评价思路

笔者采用宏观统计方法和 GIS 支持下的土壤养分时空变化一体化评价方法, 评价曲周的养分平衡状况。在宏观统计方法中, 选用养分平衡指数和养分可再生循环利用率作为评价指标对氮、磷、钾平衡及利用进行评价。定义养分平衡指数为 1 年内人类施肥和自然过程有效进入土壤中养分与农产品收获 (包括主产品和副产品) 净带出土壤的养分的比值; 另外, 定义养分可再生循环利用率为 1 年内除去人类施用化肥之外有效进入土壤的养分与农产品收获 (包括主产品和副产品) 净带出土壤的养分的比值。

GIS 支持下的土壤养分时空变化一体化评价方法, 即采用两期 (1980~1999 年) 的土壤样点养分数据, 在 GIS 支持下完成全县土壤养分时空一体化变化评价。土壤养分的空间变化评价方法是选择一些样点, 用 GIS 中空间分析功能的插值方法可以

得到其它未采样点的估计值, 这些样点可以是随机的, 也可以是规则分布的, 样点分布越多越均匀, 得到的结果越可靠越接近实际情况。土壤养分时间变化的评价方法是利用两个时段的数值相比较:

$$\Delta SI = SI_{1999} - SI_{1980} \quad (1)$$

插值得到的两个时段的土壤养分空间分布图 (栅格数据), 在 GIS 下按照公式 (1) 进行图层之间的运算, 就完成时空变化一体化评价。研究采用样条函数插值法 (spline interpolator), 实际上是用分段低次多项式去逼近函数, 并完成每段的光滑连接, 该方法适合那些逐渐变化的表面的插值, 比如高程、地下水位、养分、污染物浓度等。由于曲周县地处平原, 潮土面积占总面积的 95.96%, 而且土地利用方式基本一致, 农民在施肥时具有趋同性和从众心理, 单位面积的施肥种类和数量基本相近, 应用样条函数插值方法是合适的。

3 县域土壤养分平衡宏观统计方法及应用

3.1 农产品收获净带出土壤的养分计算

选用曲周县统计年鉴中 1988~1999 年各年种植业产量, 种类涵盖曲周县所有种植品种, 包括小麦、玉米、谷子、高粱、豆类、薯类、花生、芝麻、油菜、棉花、蔬菜、水果、瓜类 (果用) 等主产品和副产品的产量。农产品收获带出土壤养分的含量, 以净产量 (主、副产品分别计算) 乘以主、副产品各自的养分含量来计算。主产品的净产量为作物的经济产量减去用种量, 其中蔬菜、瓜类和水果用种量忽略不计。作物用种量等于单位面积用种量乘以播种面积, 具体每公顷用种量通过抽样调查和统计年鉴综合得出。作物根茬不计入产出也不计入投入, 秸秆还田只计算小麦秸秆还田率为 40%。农产品养分含量参数, 参考骆世明的常用参数表^[4], 蔬菜养分含量取白菜、菠菜、黄瓜、番茄的平均值, 水果以苹果为代表, 果用瓜类以西瓜为代表, 其它作物直接采用其籽实和秸秆的养分含量计算。最终带出土壤养分量氮以 N 计算, 磷以 P_2O_5 计算, 钾以 K_2O 计算。

3.2 人类施肥和自然过程有效进入土壤的养分计算

化肥施用量采用曲周县统计年鉴中的数据, 氮肥、磷肥和钾肥都换算成折纯量 (分别以 N、P₂O₅、K₂O 计), 根据抽样调查曲周的复合肥品种主要为磷酸二铵和各种专用复合肥, 其氮、磷、钾比例按 4:4:2 计算。化肥投入到土壤中, 由于淋洗、挥发等要损失一部分, 根据鲁如坤等研究华北地区氮肥的损失为 40%, 磷肥的损失为 0.3%, 钾肥的损失为 6%^[1]。

有机肥主要考虑人、大牲畜、猪、羊、家禽排泄物的养分含量和收集利用率来计算, 人、大牲畜 (以牛为代表)、猪、羊每年排泄物的养分总含量按照鲁如坤建议的参数计算, 即猪的每年排泄物含养分量纯氮、磷、钾分别为 4.9、1.3 和 5.0 kg; 牛分别为 40、5.3 和 25.7 kg; 羊分别为 2.3、0.4 和 1.1 kg; 人分别为 5.4、0.57 和 0.92 kg^[1], 将磷、钾换算成 P₂O₅ 和 K₂O 含量。曲周养鸡业 (舍养蛋鸡为主) 比较发达, 对于家禽以每天排泄 100 g (鲜重) / 只, 每只家禽的生长期 8 个月计, 计算出总排泄量, 再参考鸡粪养分含量计算折纯量。这些排泄物 (包括粪和尿) 的收集利用率参考中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所针对农区的收集利用率计算, 人的排泄物的综合

收集利用率为 42%; 大牲畜: 氮 28%, 磷 21%, 钾 35%; 猪: 氮 36%, 磷 27%, 钾 45%; 羊: 氮 14%, 磷 21%, 钾 35%^[6]。对于鸡粪 (舍养) 单独计算, 具体为: 氮 56%, 磷 80%, 钾 80%。

对于灌溉和降水进入土壤的养分, 灌溉中进入土壤的氮、磷、钾分别以 2.52、1.80^[5] 和 6.9 kg·ha⁻¹^[1], 降水进入土壤的氮、磷、钾分别以 11.9、0.26 和 6.6 kg·ha⁻¹^[1] 计算。磷、钾换算成 P₂O₅ 和 K₂O 含量。生物固氮, 主要是大豆和花生, 按鲁如坤等的研究, 生物固氮量 = 0.043 × 经济产量^[1]。

3.3 曲周县养分平衡状况

根据统计和部分抽样调查的资料和对土壤养分平衡指数和养分可再生循环利用率的定义, 综合计算得到表 1。以前的研究过多注重土壤养分平衡指数的研究, 而养分可再生循环利用率对可持续土地利用管理更具有意义, 因为这部分养分主要是经过自然过程、生物固氮以及人和动物的代谢重新进入土壤, 如果这个利用率高, 说明对外部的投入依赖性比重降低, 也说明区域内部农业系统有比较好的物质能量循环通道。从表 1 结果土壤养分氮、磷平衡有余, 磷有的年份平衡指数看, 曲周来达到 3.36, 氮平衡高的年份达到 1.75, 但是这两种养分在土壤

表 1 曲周县历年土壤养分平衡状况

Table 1 The status of soil nutrient balance of Quzhou county

年份 Year	农产品收获净带出养分 Net nutrient output from soil (t)			有效进入土壤的养分 Net nutrient input to soil (t)		
	氮 N	磷 P ₂ O ₅	钾 K ₂ O	氮 N	磷 P ₂ O ₅	钾 K ₂ O
1988	6 214.21	3 580.59	4 088.12	6 522.74	3 814.77	1 569.06
1989	6 452.29	3 670.55	4 162.06	7 317.39	4 688.61	1 685.67
1990	6 532.61	3 660.35	4 269.13	7 301.11	4 813.35	1 846.90
1991	6 343.05	3 562.94	4 075.02	7 507.38	5 012.43	1 887.40
1992	4 255.73	2 029.49	2 260.80	7 434.61	6 826.59	2 042.02
1993	6 058.21	2 973.85	4 144.29	10 140.84	9 897.86	3 232.73
1994	7 771.25	4 285.45	5 420.14	10 877.33	10 356.99	3 750.30
1995	8 000.05	4 084.75	5 213.02	11 387.45	9 993.03	3 138.64
1996	9 361.77	4 502.23	7 764.17	14 633.37	13 831.46	3 939.65
1997	9 588.33	4 586.31	6 278.73	13 505.84	11 420.50	3 371.34
1998	9 650.68	4 566.15	6 784.01	15 307.66	13 238.66	3 768.77
1999	9 569.48	4 481.92	6 694.38	16 720.99	14 449.96	4 401.03
年份 Year	养分可再生循环利用率 Rate of nutrient circularly use			土壤养分平衡指数 Soil nutrient balance index		
	氮 N	磷 P ₂ O ₅	钾 K ₂ O	氮 N	磷 P ₂ O ₅	钾 K ₂ O
1988	0.3914	0.2114	0.3358	1.0496	1.0654	0.3838
1989	0.3877	0.2090	0.3339	1.1341	1.2774	0.4050
1990	0.4144	0.2480	0.3482	1.1176	1.3150	0.4326
1991	0.4507	0.2975	0.3822	1.1836	1.4068	0.4632
1992	0.6873	0.6560	0.7753	1.7470	3.3637	0.9032
1993	0.5561	0.4593	0.4412	1.6739	3.3283	0.7800
1994	0.4739	0.3461	0.3624	1.3997	2.4168	0.6919
1995	0.4983	0.4450	0.4413	1.4234	2.4464	0.6021
1996	0.4717	0.4866	0.3514	1.5631	3.0721	0.5074
1997	0.4750	0.4857	0.4075	1.4086	2.4901	0.5369
1998	0.4907	0.6045	0.4330	1.5862	2.8993	0.5555
1999	0.4776	0.6396	0.4469	1.7525	3.2241	0.6574

中的行为是不同的, 氮在土壤中容易因反硝化而损失、淋洗, 而磷在土壤, 尤其在曲周这种石灰性土壤中极易被固定。钾则连年亏缺。曲周氮、磷、钾的可再生循环利用率大都低于 50%, 但呈现逐步提高的趋势, 原因是畜牧业的发展, 农产品经过过腹还田后, 提高了再生利用率。氮、磷、钾的可再生循环利用率大都低于 50%, 从另一个方面也说明, 要维持目前的产量水平, 必须保证适当的化肥的投入。这种评价对整个区域的养分平衡状况进行的量化评价, 能从总体上说明区域土壤养分的平衡状况, 但还不能具体用来指导施肥, 因为没有进行空间评价。

4 县域土壤养分时空变化一体化评价方法及应用

4.1 土壤样品的采集与分析

结合 1980 年土壤普查资料, 考虑土种分布均匀性, 在 1980 年土壤普查主剖面点采用挖掘典型剖面或设置农化样点 79 个(图 1), 用 GPS 定位, 每个点位表层都按采农化样的要求在直径 100 m 范围内采样 3~5 个, 混合按四分法采分析样品 1.5 kg, 采样日期为 1999 年 5 月初, 与 1980 年土壤普查时采样季节相同。同时采访该样点所在土地承包户的各种有关土地利用管理的情况及作物产量。全县内利用已有的浅井调查测量地下水埋深和水质。用半微量凯氏法测定土壤全氮; 碳酸氢钠浸提-钼锑抗



图 1 土壤采样样点分布

Fig.1 The distribution map of soil samples

比色法测定土壤有效磷; 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾, 这些测定方法与 1980 年土壤普查的测定方法一致。表 2 为 79 个土壤样点两个时段的氮、磷、钾含量统计结果。

4.2 曲周县 20 年 (1980~1999) 土壤养分时空变化评价结果

将曲周县土壤图数字化, 利用 GPS 定位的样点坐标直接上图, 把每个样点的养分含量建立属性数据库, 利用插值完成每个由样点到区域的估计, 同一属性的 2 个时段的区域估计进行图层之间相减运算, 就完成了时空变化的一体化评价。

曲周县土壤养分变化情况是: 全氮平均含量由 $0.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $1.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2), 对其变化进行时空变化分析, 全氮含量变化全部增加, 这与当地农民重视氮肥有关, 鉴于土壤全氮的平均含量已达 $1.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 应该适当控制氮肥的施用。应用 1999 年同期在曲周的地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的调查数据, 根据李保国等的研究, 曲周县浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的分布是各向同性的^[9], 可以用样条函数插值分析其分布(图 3), 按我国采用的地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (以纯 N 计) 超标标准 ($20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 只有很小区域超标, 主要集中在曲周县城附近, 滏阳河和老漳河在此汇合, 河道中大量富含氮的生活和生产废水在此被闸门拦截, 通过灌溉进入农田, 这里也是菜地集中区, 为获得高产量, 大量施用氮肥, 每公顷每年近 $13\,500 \text{ m}^3$ 的灌溉定额, 又为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋洗提供了条件, 所以这些因素综合作用导致地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量超标。对比 1980 年曲周水利局在枯水期做的地下水水质化验结果, 当时全县采样 25 个, 有 16 个未检出, 而 1999 年全部都有硝态氮。把土壤全氮的时空变化图与地下水硝态氮分布图对比分析, 不难发现二者在空间上存在一定相关性, 由于浅层地下水现在已不作为饮用水和牲畜用水。所以, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量超标对人、畜健康影响很小, 但从节约化肥和保护环境角度, 这个问题应该引起重视。

土壤有效磷平均由 $4.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $21.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤速效钾的变化平均由 $168.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $103.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。土壤有效磷含量略有下降的面积有 55.95 km^2 , 其余都有不同程度上升(图 4)。土壤速效钾基本无变化(变化在 $-20\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的面积为 42.62 km^2 , 稍微有上升的面积有 15.90 km^2 , 其余都有下降(图 5)。

表 2 土壤样点养分含量统计结果

Table 2 The statistics results of nutrient content of soil samples

统计项目 Items	区间 Scope	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	变异系数 Coe. of variance
1999 年全氮 Total-N at 1999 (g·kg ⁻¹)	1.09	0.66	1.75	1.05	0.1940
1980 年全氮 Total-N at 1980 (g·kg ⁻¹)	0.50	0.30	0.80	0.53	0.2213
1999 年有效磷 Available-P ₂ O ₅ at 1999 (mg·kg ⁻¹)	79.0	1.8	80.8	21.86	0.7609
1980 年有效磷 Available-P ₂ O ₅ at 1980 (mg·kg ⁻¹)	12.5	1.0	13.5	4.84	0.4410
1999 年速效钾 Exchangeable-K ₂ O at 1999 (mg·kg ⁻¹)	187.02	47.98	235.0	103.4	0.4800
1980 年速效钾 Exchangeable-K ₂ O at 1999 (mg·kg ⁻¹)	182	103	285.0	168.3	0.2543

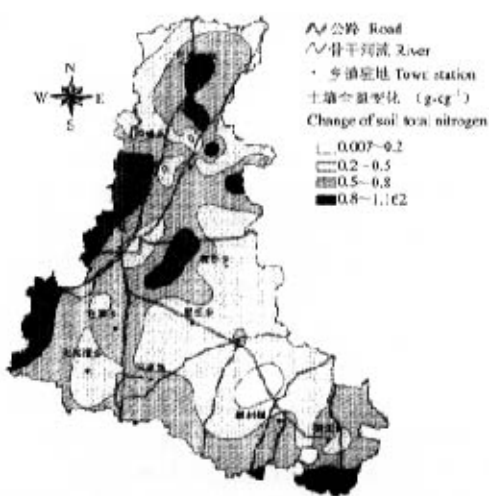


图 2 曲周县土壤全氮时空变化

Fig.2 The spatial-temporal change of total nitrogen

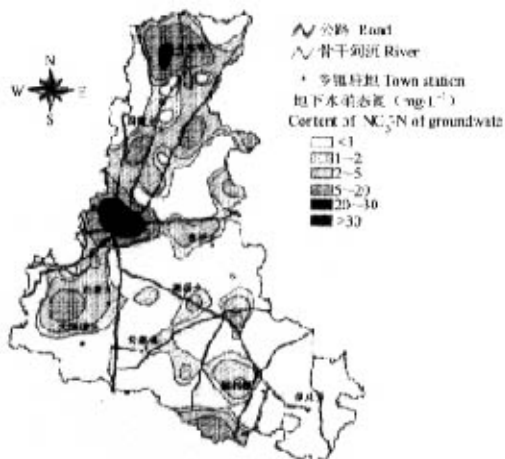


图 3 由周县地下水 NO₃⁻-N 含量空间分布

Fig.3 The spatial distribution of NO₃⁻-N of groundwater

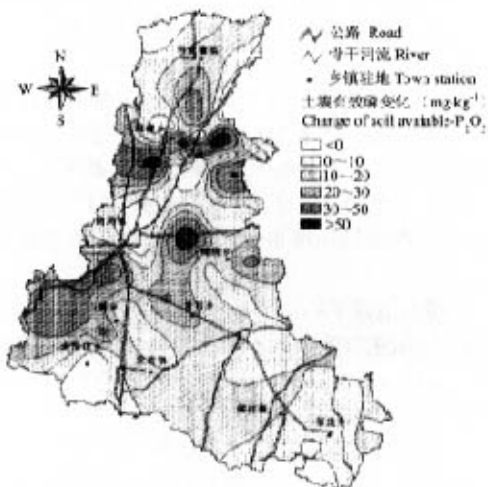


图 4 曲周县土壤有效磷时空变化

Fig.4 The spatial-temporal change of available-P₂O₅

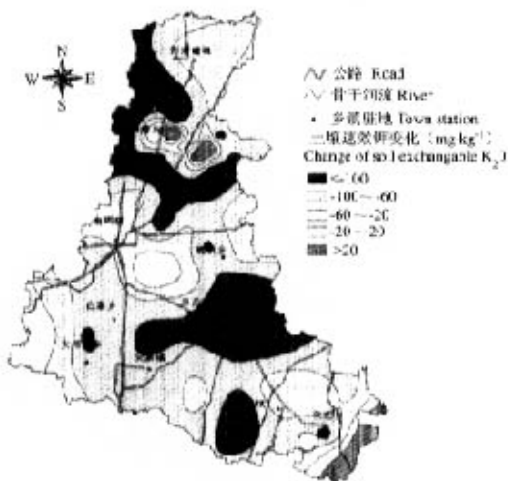


图 5 曲周县土壤速效钾时空变化

Fig.5 The spatial-temporal change of exchangeable-K₂O

5 讨论

在土地利用管理系统中, 土地质量、自然生态环境的特征和变动是生物自然过程与人类社会经济过程复合作用的结果, 主要体现的是两类过程的综合效应, 应从二者变化的相关点上把握土地利用管理系统的可持续性。生物自然数据和社会经济数据的系统边界在县域尺度上具有良好的重合性, 在县域尺度上可以很好地从这两个方面进行综合研究。

利用 GIS 的空间分析功能对土壤养分的时空变化进行一体化评价, 可以直观地揭示土壤养分的时空变化规律和发展趋势。但这种方法也有一定的局限性, 用插值法做出的分布是基于样点的概率估计, 这种可能的概率与真正的区域实际分布可能还有一定差距, 尤其是当样点出现异常值和分布不均匀或数量不足时, 但通过加大取样密度这一问题和改进插值方法来解决。在地形、土壤类型和土地利用方式变化大的地区, 这种方法的评价精度也可能会降低, 可以通过先划分类型区, 分区进行插值的方法步骤, 来提高精度。

无论从宏观统计评价方法还是从土壤养分时空变化的结果来看, 二者的结果和变化趋势是一致的, 即氮、磷平衡有余, 钾损耗严重。之所以产生这种养分变化格局, 与土地利用集约度的变化有关, 1980 年耕地灌溉率为 50.1%, 到 1999 年耕地灌溉率增加到 80.7%, 当地农民的年氮肥施量由碳酸氢铵 $375 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (折合纯氮 $63.75 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) 增至 $1\ 500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (折合纯氮 $255 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), 磷肥由不施或极少到平均施过磷酸钙 $1\ 500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (折合 P_2O_5 $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) 以上, 除了部分菜地施用钾肥以外, 其余很少施用。土壤氮总体已经达到一个较高的水平, 已经对浅层地下水产生了影响; 磷在石灰性潮土和盐渍化潮土中, 极易被固定, 且随着盐碱度的增加, 磷细菌和磷酸酶活性降低, 土壤磷的有效性降低, 磷的平衡指数虽然高于氮, 但还应该重视磷肥施用。土壤速效钾下降迅速, 一方面与当地施肥习惯有关, 另一方面由于多年盐碱地改良冲洗造成钾离子流失, 有些地块缺钾比较严重, 所以在曲周应采取“控氮稳磷补钾”的农田养分管理措施。

同时, 应大力推广秸秆还田和秸秆过腹还田, 农牧结合, 提高养分的可再生循环利用率。

致谢: 中国农业大学胡克林博士提供地下水硝酸盐含量原始数据。

References

- [1] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理与施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998.
LU R K. *The Principles of Soil-plant Nutrition and Fertilization*. Beijing: Chemical Engineering Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 何电源. 农业生态系统的养分平衡是可持续农业的重要条件. 农业现代化研究, 1999, 20(4): 241-243.
HE D Y. Nutrient balance of agro-ecosystem is important condition for sustainable agriculture. *Research of Agricultural Modernization*, 1999, 20(4): 241-243. (in Chinese)
- [3] 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统养分平衡、循环和调控研究. 土壤学报, 1998, 35(4): 501-509.
He Y Q, Huang X Q. Nutrient cycling, balance and regulation in red soil agro-ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 501-509. (in Chinese)
- [4] 骆世明. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Luo S M. *Agricultural Ecology*. Beijing: China Agriculture Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 辛德惠. 浅层咸水型盐渍化低产地区综合治理与发展. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
Xin D H. *Comprehensive Managing and Developing of Saline and Low Yield Area in North China Plain*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990. (in Chinese)
- [6] 中国农业科学院农业自然资源和农业区划研究所. 中国耕地. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
Institute of Natural Resources and Regional Planning of Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Cultivated Land of China*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1995. (in Chinese)
- [7] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: research plan. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2000, 81: 93-102.
- [8] Bindraban P S, Stoorvogel J J, Jansen D M, Vlaming J, Groot J J R. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 81: 103-112.
- [9] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 张凤荣. 区域浅层地下水硝酸盐含量评价的指示克力格法. 水利学报, 2001(3): 1-5.
Li B G, Hu K L, Huang Y F, Zhang F R. Application of indicator Kriging method for assessing nitrate content of regional shallow ground water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, (3): 1-5 (in Chinese)

(责任编辑 卞海军)