

中国农田氮面源污染研究:

II 污染评价指标体系的初步制定

侯彦林, 李红英, 周永娟, 赵慧明

(中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以国内现有研究成果为重要参考,初步制定了农田氮面源污染评价指标体系,包括建立了使用统计资料评价区域性氮面源污染的指数及其污染等级划分,制定了微观或小区域氮面源污染评价的若干方法,并建立了评价标准使用的优先顺序,目的在于可以使用相对统一的指标体系来比较不同的研究结果。其中,区域性氮素面源污染的指数分为五个污染等级。微观或小区域氮肥污染评价指标体系包括:根据地下水硝态氮含量划分为四类,根据土壤硝态氮绝对淋失量划分为四类,根据硝态氮淋失浓度相对数量划分为四类,根据土壤硝态氮残留量划分为四类。

关键词:中国;农田氮面源污染;污染程度评价;指标体系

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1277-06

Nitrogen Non-point Field Pollution in China: II Establishment of Index System for Evaluation of Pollution Degree

HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHOU Yong-juan, ZHAO Hui-ming

(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract:Based on the previous study, the index system for evaluation of nitrogen fertilizer pollution and the preference usage order of the system was set up, which was consisted of establishment of index to evaluate the regional nitrogen non-point pollution with statistic data and grading of pollution, set up different methods to evaluate the nitrogen non-point pollution of microcosmic or micro regional, the priority of evaluation criterion was established, the aim of which was to comparison the different study results with the relatively uniform index system. Index of regional nitrogen non-point pollution has five pollution grades. Index for microcosmic or micro regional were consisted of: four types based on nitrate contents of groundwater, four types based on absolute losses of soil nitrate, four types based on relative concentration losses of soil nitrate, four types based on determination of soil nitrate.

Keywords: China; nitrogen non-point field pollution; evaluation of pollution degree; index system

1 农田氮淋失“物质-动力-因素”概念模型的建立

肥料氮损失的最后去向是:一、回空气中,参加氮的自然循环过程;二、进入地下水或地表水体中。前者暂时不构成对水体的污染,而后者损失主要取决于三个条件。即:

淋失的物质基础:包括施肥量和土壤含氮量(含

前茬残留氮量),土壤氮含量(全量和水溶性含量)相对稳定(水溶性含量过高也主要是过多施肥造成的),变幅不大,故将施肥量作为造成肥料淋失的主要物质基础是合理的,而有关水土流失带走的土壤氮,原则上不是施肥过量造成的,所以本文不做具体分析。

淋失的驱动力:包括降水量和灌溉量,实际为其总量,后者可人为地调控。

影响淋失的环境条件:包括地形地貌、土壤性质、覆盖、平衡施肥等等,它常常以因素组合的形式起作用,有时起加速淋失作用,有时起抑制淋失作用,有时不明显;影响因素的作用在宏观分析中可以忽略,但在区域分析中可作为进一步反映淋失差异的评价指标而使用。

在对肥料面源污染程度和趋势进行宏观分析中,

收稿日期:2007-12-14

基金项目:国家环境保护局资助

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林省人,博士,教授,主要从事生态平衡施肥理论、方法和软件以及粮食增产潜力研究。

E-mail: ylhoul@263.net

特别是对像中国这样地域辽阔的国家,必需有一套估算的算法(模型)和配套的指标体系做保证,否则很难汇总千差万别的资料和数据,更难以得出科学的结论。然而目前还没有统一的模型和评价指标体系可供使用。基于这一分析,我们根据国内外众多研究结果,建立了一套适合当前研究数据的有助于宏观分析的农田氮素淋失概念模型和相应的指标体系,希望借助于此,能够将千差万别(研究目的、研究内容、环境背景条件、对象、时间都不同等等)的研究结果汇总到一起,做一相对可比较的基础,帮助进行宏观分析,从中找出一些规律,作为制定防治污染决策的科学依据或参考。

氮在土壤剖面中的累积和移动,受施氮量,施肥时间和方法,降水(降水强度、降水时间和降水分布)和灌溉(次数和数量),地形地貌特点,土壤质地,土体构型,残留氮含量,作物类型及其根系深度,植被覆盖条件,轮作制度,肥料种类,人为管理措施等诸多因素影响,存在非常大的年际变化。决定淋失的两大宏观因素是:施氮量和水量,绝对不透水的土壤是没有的,只要上述两个条件具备,淋失就一定会发生,只是其快慢受影响因素组合的影响。我们在上文中的结论中明确指出“从5类污染区南方和北方省份数量几乎各占一半分析,气候条件不是造成氮素污染的主要因素或内在因素”^[2],就说明了这一点。我们根据众多研究结果,将其概括为以下概念模型。

设: $Y=f(\text{fertilizer dose, rainfall, effect factors})\text{spatial unit, time period}$

$$=f(f, r, a)u, t \quad (1)$$

式(1)中, Y ——氮素淋失量,某一时段某一土地利用方式下氮素淋失到1 m或2 m土体下的数量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{season}^{-1}$;

fertilizer dose——肥料用量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{season}^{-1}$;

rainfall——降水和灌溉总量, $\text{mm}\cdot\text{season}^{-1}$;

effect factors——影响因素组合,分类型和等级,宏观分析时可忽略;

spatial unit——空间单元,某一区域或某一土地利用方式;

time period——时间段,一年或一季或生长季节。

首先,将氮肥用量(暂不考虑土壤氮含量)作为氮肥面源污染区域性差异的重要原因,它是淋失的物质基础,没有足够的氮肥施用量,不会产生氮的淋溶;施氮量不同也是造成区域内不同土地利用方式氮素淋失差异的主要因素;只有氮肥施用量超过一定数量后才发生明显淋失,因为作物-土壤体系具有一定程度

的缓冲能力。氮肥推荐中存在一个安全区,施用比作物最高或经济产量施氮量略多的肥料氮不会立即对地下水水质造成危险。这是因为土壤-作物系统具有缓冲性,在此期间增加氮用量,产量和土壤剖面无机氮都不会明显增加。其缓冲机制在于:多施的氮可增加植物蛋白质、通过反硝化损失、土壤固定、氨挥发、植物的气态损失以及硝酸盐的淋失。

其次,这个概念模型将大气降水和灌溉水作为氮素田间淋失的驱动力,它是氮素面源污染区域性差异的主要原因,根据其空间差异性对全国进行分区,划分出不同氮素淋失强度区(如三大类型区);只有当降水或灌溉使土壤水分达到一定数量后才能携带氮素发生纵向、侧向和横向的运移。

最后,将区域内地形地貌和土壤性质等作为区域内氮素淋失量差异的主要因素,它可加速或减缓氮素淋失速度。

三者之间的关系如下:降水和灌溉总量构成肥料淋失的外因动力,氮肥施用量构成氮肥淋失的内因物质基础,二者一起决定氮肥淋失区域间差异即宏观格局;地形地貌和土壤质地等构成氮肥淋失的影响因素组合,与氮肥施用量一起构成氮肥淋失的区域内差异,即微观变异。以上分析可以作为划分农田氮素面源污染指标体系的依据。

2 区域性氮面源污染指数的定义及其污染等级划分方法

就目前国内外区域性研究资料的数量和质量而言,很难获得某一行政单元或自然单元内大量的研究资料,因此要估算一个区域农田氮污染现状,目前还必须借助宏观的区域性的肥料施用统计资料来进行估算,这就要求我们必须建立一个相应的估算方法并对其结果进行分级。上文结论中明确指出:气候条件不是造成氮污染的主要因素或内在因素^[2]。这一结论告诉我们,在进行宏观按省估算农田氮污染时,只使用施氮量就可以对氮污染程度进行划分。

另一方面,我们认为,气候条件和耕作制度对于一定的空间单元而言,从平均意义上讲变化不大,所以,使用农田氮素“驱动力-状态-风险”概念模型进行分析,即:

$$\text{设: } Y=f(f)r, a, u, t \quad (2)$$

在此,驱动力 f 为氮肥用量;状态 Y 为氮污染指数,可对 Y 进行污染等级划分。具体是根据氮单位用量进行半定量评价的。

在具体计算时,如前文所述定义了“肥料氮污染指数计算方法”,即

区域性肥料氮污染指数=(最近 5 年区域内平均施氮量-180)/180×100% (3)

将全国分成两个类型区,根据污染指数划分为五个等级:无污染区、轻微潜在污染区、轻度污染区、中度污染区、强度污染区。

3 微观或小区农田氮面源污染评价指标体系

3.1 氮淋失的肥料用量分级

分级情况见表 1。

3.2 氮淋失的大气降水和灌溉总量分级

土壤长期淋失发生的条件是:降水量(包括灌溉量)大于径流与蒸发总量之和,土壤渗透性好;土壤短期淋失发生的条件是:一次降水或灌溉量过大^[1-2]。总之,土壤湿度大于保水能力时,淋失才会发生。表 2 分类是就一般情况而言的,其中生长季水量 250 mm 以下和 550 mm 以上的假设是大致地考虑到干旱和湿润地区一年的降水量情况而制定的,中间的 3 个档次间距均为 100 mm。这样划分虽然没有特别的科学依据,但是至少暂时先给出一个相对的等级,待以后研究资料丰富时,可以再行修改以下标准(下同)。

表 2 肥料淋失的大气降水和灌溉总量分级

Table 2 Grade of gross atmosphere precipitation and irrigation of fertilizer leaching

水量/mm	淋失程度	简单描述
<250	R _I	每次水量不超过 50 mm 时,一般不发生肥料淋失
250~350	R _{II}	季内可发生轻微淋失(每次水量超过 50 mm 除外)
350~450	R _{III}	季内可发生轻度淋失(每次水量超过 50 mm 除外)
450~550	R _{IV}	季内可发生中度淋失
>550	R _V	季内可发生强度淋失

3.3 氮淋失类型划分

依据氮用量分级和水量分级划分以下氮淋失类

表 1 氮淋失的肥料用量分级(kg·hm⁻²·season⁻¹)

Table 1 Grade of fertilizer dosage of nitrogen leaching(kg·hm⁻²·season⁻¹)

氮用量	淋失程度	简单描述和划分依据
<150	F _I	施肥量少,一般水分类型下不会发生淋失,与影响因素关系不大。基本不会发生肥料淋失;该施肥量为全国多数大田作物平均适宜施氮量下限以下,此时,根系分布与养分分布相对应,氮肥利用率最高
150~225	F _{II}	施肥量略高于全国多数大田作物平均适宜施氮量的下限,但在高产地区或高产作物或粘重土壤或水肥管理措施得当的情况下,也可作为其平均适宜施氮量的范围,也不至于使肥料产生明显的淋失;这一等级也可称之为氮肥用量缓冲期间,是因地制宜调整氮用量的范围;但 R _{III} 、R _{IV} 、R _V 条件下可发生轻微的淋失,淋失总数不大
225~300	F _{III}	可发生轻度淋失,有一定的淋失量,并随施肥量增加和水量增加淋失量呈线性增加;对于多数大田作物而言已经超过其经济施肥量或发生明显淋失的施肥量界限,但对于果树和蔬菜等经济作物可以是平均适宜施氮量的范围
300~375	F _{IV}	可发生中度淋失,并随施肥量增加和水量增加淋失量呈线性增加,淋失量稍大;超过多数果树和蔬菜的平均适宜施氮量范围
>375	F _V	生强度淋失,并随施肥量增加和水量增加淋失量呈指数增加,淋失量较大;严重超过多数果树和蔬菜的平均适宜施氮量范围

表 3 氮淋失类型和强度划分

Table 3 Classification of type and intension of fertilizer leaching

	F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V
R _I	0	0	0	0	轻微潜在
R _{II}	0	0	0	轻微潜在	轻微淋失
R _{III}	0	0	轻微潜在	轻微淋失	轻度淋失
R _{IV}	0	轻微潜在	轻微淋失	轻度淋失	中度淋失
R _V	0	轻微淋失	轻度淋失	中度淋失	强度淋失

型和强度。

3.4 环境因素影响程度分级

地貌类型划分:山地和丘陵开垦为耕地情况下,将加速肥料的淋失,并以水土流失的方式为主;平地:以土壤淋失方式为主^[3-7]。

土壤水分条件划分:水浇地:肥料淋失主要受灌溉量和次数的影响,也受降水影响;旱地:肥料淋失受降水影响;水田:一般情况下不受灌溉和降水影响,主要受质地和肥料用量影响^[8-13]。

土壤质地类型划分:粘土:肥料淋失弱;壤土:肥料淋失中;砂土:肥料淋失强^[9,11,14-18]。

环境因素组合分类:所有组合为 18 类,可简化为 9 类,代号 A1-A9,其他类型不多见,见表 4。

3.5 具体地块淋失类型划分

某一具体地块是否发生淋失主要取决于施氮量和降水或灌溉情况^[8,12,14,19,20],见图 1,其中,A 为平均适宜施氮量,B 为明显产生淋失的施氮量,D 为产生明显

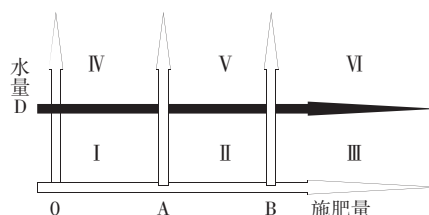


图 1 根据施氮量和水量划分的具体地块淋失类型

Figure 1 Leaching type based on the gross of fertilizer and water

表 4 环境因素组合分类

Table 4 Cassification of combination of environment factors

地貌类型	土壤水分条件	土壤质地类型	代号	肥料淋失特征描述
山丘地	旱地	粘土、壤土、砂土	A1	山丘旱地水土流失加速型
山丘地	水田	粘土	A2	山丘水田土壤淋失非显著型
平地	水浇地	粘土	A3	平地水浇地土壤淋失阻止型
平地	水浇地	壤土和砂土	A4	平地水浇地土壤淋失加速型
平地	旱地	粘土	A5	平地旱地土壤淋失阻止型
平地	旱地	壤土	A6	平地旱地土壤淋失非显著型
平地	旱地	砂土	A7	平地旱地土壤淋失加速型
平地	水田	粘土	A8	平地水田土壤淋失非显著型
平地	水田	壤土	A9	平地水田土壤淋失加速型

淋失的水量。各类型特点见表 5。

4 氮污染程度评价指标体系

以上讨论的是农田氮面源污染的发生条件和影响因素的等级或类型划分方法,包括宏观和微观两方面评价方法。但是,就某一区域或微观的某一小区域或地块是否存在氮污染及其程度如何,必须具体根据地下水或土壤氮素含量或淋失量来进行评价,以下是几方面的研究结果。

4.1 根据地下水硝态氮含量的划分标准

这是评价施氮影响地下水质的直接标准,也是多年施氮影响的累计结果。该指标可靠、具体,但难以反映氮素污染的发生过程。参照国内外现行标准,将肥料氮引起的地下水硝态氮含量定义为大于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 有污染,最大允许值为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。具体划分标准见表 6。

4.2 根据土壤硝态淋失量的划分标准

这是评价施氮影响地下水质的间接标准,也可以认为是肥料氮当季对地下水污染的直接威胁程度。该指标可具体反映氮污染发生的过程和数量,但还不能断定其对地下水污染的增量。

理论依据:多数作物的根系难以伸展到 1 m 或 2 m(不同作物根系可伸展深度不同)以下土层吸收硝

表 6 根据地下水硝态氮含量划分的氮污染地下水标准

Table 6 Standard of nitrogen pollute the ground water based on the nitrate contents of groundwater

地下水硝态氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	肥料氮对地下水的污染程度
<10	没有污染
10~20	轻度污染
20~50	中度污染
>50	强度污染

态氮;根据硝态氮运动的“活塞原理”,1 m 或 2 m 土层以下的硝态氮大部分难以返回到上层,即硝态氮总是以向下运动为主的。

在评价氮素通过土壤淋失到 1 m 或 2 m 土层之下时,经常用到两种表示方法,其一是硝态氮淋失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{season}^{-1}$),其二是每升淋失液中硝态氮的含量,即浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。然而,这两个指标并不能直接用来判断氮素是否可以污染地下水,因为它们到达地下水之后,将生产稀释作用,只有日积月累才能影响到地下水中硝态氮的浓度,前者是绝对数值,后者必须和淋失水量相乘或经过积分才能求出绝对数值。

4.2.1 按淋失绝对数量的划分标准

理论依据:以我国平均适宜施氮量标准作为依据划分氮淋失等级,见表 7。

表 5 根据施氮量和水量划分的具体地块淋失类型

Table 5 Leaching types in certain field based on nitrogen fertilizer usage and quantity of water

类型	施氮量	水量	地块淋失类型
I	小于 A	小于 D	基本没有淋失
II	土壤-作物缓冲能力范围内	小于 D	不会发生明显淋失
III		小于 D	氮会积累在土壤剖面中,但淋失弱
IV	小于 A	大于 D	可被淋失的物质少,基本无淋失
V	在 A 和 B 之间	大于 D	由于有了一定的淋失物质基础,但还在土壤-作物缓冲范围内,所以可能发生轻微或轻度淋失,淋失量与水量呈线性关系
VI	大于 B	大于 D	淋失非常明显,淋失量可能与施肥量和水量呈现二元一次函数关系,并产生交互作用

表 7 根据淋失绝对数量划分的氮污染地下水标准

Table 7 Standard of nitrogen pollute the ground water based on absolute losses of nitrate

1 m 或 2 m 土层下的硝态氮 淋失量/kg·hm ⁻² ·season ⁻¹	相当于全国大田作物平均 适宜施氮量(150 kg·hm ⁻² · season ⁻¹)的百分比/%	肥料氮对地下 水污染程度
<15	<10	没有污染
15~30	10~20	轻度污染
30~45	20~30	中度污染
>45	>30	强度污染

4.2.2 按淋失浓度相对数量的划分标准

这里假设全国农田平均每季降水和灌溉总量为 400 mm, 其中有 100 mm 水淋失到 1 m 或 2 m 土层之下(北京地区水渗漏量平均为降水量的 25%), 所以, 如淋失液中硝态氮浓度为 $P(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, 则绝对淋失量为:

$$Q=10\,000 \times 0.1 \times 1\,000 \times P / 1\,000\,000 = P \quad (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1})$$

(注: $1 \text{ m}^3=1\,000 \text{ L}$; $1 \text{ kg}=1\,000\,000 \text{ mg}$)

如果仍将全国大田作物平均适宜施氮量定为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$, 则 P 的划分标准应定为 15、30、45。于是得到根据淋失液浓度划分对地下水污染程度的标准见表 8。

表 8 根据淋失浓度相对数量划分的氮污染地下水标准

Table 8 Standard of nitrogen pollute the ground water based on relative concentration losses of nitrate

淋失液浓度 /mg·L ⁻¹	相当于全国大田作物平均适宜施氮量 (150 kg·hm ⁻² ·season ⁻¹)的百分比/%	肥料氮对地下 水污染程度
<15	<10	没有污染
15~30	10~20	轻度污染
30~45	20~30	中度污染
>45	>30	强度污染

4.3 根据土壤硝态氮残留量的划分标准

这是评价施肥影响地下水质的潜在标准, 无论如何, 土壤中残留的氮都会威胁到地下水, 只要有淋失的水分条件, 残留的氮就会下移, 而从长期气象资料来看, 几年中总会有几次大的降水。

理论基础: 按“零”残留环保要求划分潜在污染等级。有研究表明, 按累计率超过 10% 作为累计严重的界限是合适的^[21]。

至此, 我们制定了氮对地下水污染的参考评价指标体系。其优先使用顺序是: 直接标准、间接标准(按绝对量、按淋失浓度顺序)、潜在标准。这样, 在评价不

同研究结果时, 就有了相对的评价标准, 以便比较不同的研究结果; 当几个指标并存时, 按优先使用权选用。强调指出, 该指标体系只具有一般意义, 不同地区在使用时可因地制宜; 另外, 该指标体系只在本研究中使用, 其理论和实践依据还有待同行继续完善。

表 9 根据土壤硝态氮残留量划分的氮污染地下水标准

Table 9 Standard of nitrogen pollute the ground water based on determination of soil nitrate

1 m 或 2 m 土层内硝态氮残 留量/kg·hm ⁻² ·season ⁻¹	相当于全国大田作物平均 适宜施氮量(150 kg·hm ⁻² · season ⁻¹)的百分比/%	肥料氮对地下 水污染程度
<15	<10	没有污染
15~30	10~20	轻度潜在污染
30~45	20~30	中度潜在污染
>45	>30	强度潜在污染

表 10 肥料氮源污染程度评价指标体系汇总表

Table 10 Index system for evaluation of pollution degree

评价类型	具体指标	污染或潜在污染程度
微观或小区评价标准:		
直接标准	地下水硝态氮含量/mg·L ⁻¹	
	<10	没有污染
	10~20	轻度污染
	10~20	中度污染
	>50	强度污染
间接标准	土壤硝态氮淋失情况(淋出 1 m 或 2 m 土体以下)	
	按绝对量/kg·hm ⁻² ·season ⁻¹	
	<15	没有污染
	15~30	轻度污染
	30~45	中度污染
	>45	强度污染
	按淋失浓度/mg·L ⁻¹	
	<15	没有污染
	15~30	轻度污染
	30~45	中度污染
	>45	强度污染
潜在标准	土壤硝态氮残留量/kg·hm ⁻² ·season ⁻¹ (1 m 或 2 m 土体内)	
	<15	没有潜在污染
	15~30	潜在轻度污染
	30~45	潜在中度污染
	>45	潜在强度污染
宏观或大区域评价标准: 最近 5 a 区域肥料氮污染指数%		
第一类型区	≤0	无污染
	0~25	轻微潜在污染
	25~50	轻度污染
	50~75	中度污染
	≥75	强度污染
第二、三类型区	≤0	无污染
	0~10	轻微潜在污染
	10~30	轻度污染
	30~50	中度污染
	≥50	强度污染

参考文献:

- [1] 黄满湘, 章 申. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 147-154.
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 147-154.
- [2] 罗 阳. 灌溉施肥条件下田间氮素在土壤中迁移情况的研究 [J]. 水资源保护, 2000(4): 7-11.
LUO Yang. Research of nitrogen movement in soil under irrigation-fertilization[J]. *Water Resources Protection*, 2000(4): 7-11.
- [3] 王晓燕, 胡秋菊. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 30-33.
WANG Xiao-yan, HU Qiu-ju. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 30-33.
- [4] 吕唤春, 方志发. 千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 91-92, 132.
LU Huan-chun, FANG Zhi-fa. Effect of sloping land use pattern on nitrogen and phosphorus loss in Qiandaohu watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 91-92, 132.
- [5] 袁东海, 张如良. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 188-198.
YUAN Dong-hai, ZHANG Ru-liang. Losses of nitrogen and phosphorus under different land use patterns in small red soil watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 188-198.
- [6] 刘 方, 何腾兵. 黄壤旱坡地梯化对土壤磷素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 75-78.
LIU Fang, HE Teng-bing. Changes of phosphorus loss of surface runoff from yellow soil in hilly areas by terrace cropping[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 75-78.
- [7] 张兴昌, 邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 617-626.
ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. Soil nitrogen loss by erosion as affected by vegetation cover and comprehensive managements in Zhi-fanggou catchment of hilly loess plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 617-626.
- [8] 孙昭荣. 北京降水和土壤下渗水中的氮素研究[J]. 土壤肥料, 1993(2): 8-10.
SUN Zhao-rong. Research of nitrate in precipitation and soil leaching water in Beijing[J]. *Soils and Fertilizers*, 1993(2): 8-10.
- [9] 吴雪彪, 陈士银. 旱耕赤红壤氮磷流失污染研究[J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19(2): 58-62.
WU Xue-biao, CHEN Shi-yin. Study on the nitrogen and phosphorus losses pollution from nonirrigated lateritic red earth[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1999, 19(2): 58-62.
- [10] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6): 291-297.
ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Research evolvement of nitrogen leaching in field[J]. *Soil*, 1998(6): 291-297.
- [11] 陈思根. 旱地石灰性土壤氨挥发特点及其氮素损失途径[J]. 干旱地区农业研究, 1988(3): 28-37.
CHEN Si-gen. Traits of ammonia volatilization and ways of nitrogen losses in dry lime land soil[J]. *Agro Research in Droughty Region*, 1988(3): 28-37.
- [12] 李裕元, 邵明安. 模拟降雨条件下施肥方法对坡面磷素流失的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1421-1424.
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an. Effects of phosphorus application methods on phosphorus loss on sloping land under simulated rainfall[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1421-1424.
- [13] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240-242.
LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 240-242.
- [14] 陈 欣, 张克中. 红壤坡地磷素流失规律及其影响因素 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 38-41, 63.
CHEN Xin, ZHANG Ke-zhong. Law of phosphorus loss and its affecting factors in red soil slopeland[J]. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1999, 5(3): 38-41, 63.
- [15] 刘 方, 何腾兵. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 37-40.
LIU Fang, HE Teng-bing. Phosphorus loss by runoff in various dryland from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2): 37-40.
- [16] 余贵芬, 毛知耘. 氮素在紫色土中的移动和淋失研究 [J]. 西南农业大学学报, 1999, 21(3): 228-232.
YU Gui-fen, MAO Zhi-yun. Study of N migration and leaching loss in purple soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 21(3): 228-232.
- [17] 孟令尧. 太行山自然状态土壤氮磷流失比较 [J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(4): 97-99, 103.
MENG Ling-yao. Comparative of soil N and P losses in taihang region[J]. *Geography and Soil Research*, 2002, 18(4): 97-99, 103.
- [18] 朱安宁, 张佳宝. 黄潮土的土壤水渗漏及硝态氮淋溶研究 [J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 27-30.
ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao. Soil water deep drainage and nitrate leaching in fluvo-aquic soil[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(1): 27-30.
- [19] 汤丽玲. 不同灌溉与施氮措施对露地菜田土壤无机氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 282-287.
TANG Li-ling. Effects of different irrigation and fertilization strategies on soil inorganic N residues in open field of vegetable rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 282-287.
- [20] 李荣刚, 夏源陵. 太湖地区节水灌溉与氮素淋失[J]. 河海大学学报, 2001, 29(2): 21-25.
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling. Water saving irrigation and control of nitrogen leaching in Taihu lake region[J]. *Journal of Hehai University*, 2001, 29(2): 21-25.
- [21] 党廷辉, 郭胜利. 黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层积累的定量研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 58-60, 75.
DANG Ting-hui, GUO Sheng-li. The amount and ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation under long-term fertilization in dry highland of loess plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 58-60, 75.
- [22] 侯彦林, 周永娟, 李红英, 等. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271-1276.
HOU Yan-lin, ZHOU Yong-juan, LI Hong-ying, et al. Nitrogen Non-point field pollution in China: I Regionalization of pollution types and pollution, analysis in different province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1271-1276.