

黄河流域氮素流失模数研究

陈静生, 于涛

(北京大学 环境学院, 北京 100871)

摘要: 氮素流失模数是研究区域氮循环与氮平衡的基本参数, 对其进行研究有助于从大区域角度评价我国化肥的利用效率。按多年年径流量均值和多年河水氮浓度均值计算所得的黄河 19 个主要支流的流域氮素流失模数在 $0.073 \sim 1.665 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 氮素流失模数的大小与区域人口和农业生产水平存在正相关性; 由于存在“流域面积尺度效应”, 使按干流数据计算得到的黄河流域的氮素流失模数显著地小于按支流资料计算得到的氮素流失模数; 由于干流各站点控制的流域范围具有重叠性以及下游水质对上游水质有继承性, 使按干流各站数据计算得到的氮素流失模数值间差异不大; 20 世纪 90 年代以后黄河流域的氮素流失模数大大增加。中游头道拐站以上流域 1995 年的氮素流失模数比 1985 年增加 4 倍以上, 下游花园口站以上流域 1996 年的氮素流失模数比 1986 年增加 2 倍以上; 黄河流域流失的氮主要是以溶解态形式存在于水相中的氮素, 流域氮素流失模数与泥沙径流模数之间无明显关系。以花园口站为控制点计算所得的黄河流域的氮素流失模数小于以大通站为控制点计算所得的长江流域的氮素流失模数。黄河流域的氮肥流失率(指黄河流域流氮素流失总量占流域氮肥总施入量的比例)在 90 年代后期有快速增加趋势, 1998 年比 1997 年增加 12%, 1999 年又比 1998 年增加 18%。我国氮肥流失率逐年增高和增长速度越来越快的情况, 应引起我国农田肥料工作者、环境保护工作者和政府高层决策部门的高度重视。

关键词: 黄河流域; 氮素流失模数

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 2043(2004)05 - 0833 - 06

Characteristics of Nitrogen Loss Modulus in the Yellow River Basin

CHEN Jing-sheng, YU Tao

(College of Environmental Science, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: Nitrogen loss modulus is one of the basic parameters in the studying of regional nitrogen cycling and nitrogen balance, and the study of this parameter can help assess the utilizing efficiency of the nitrogen fertilizer from the perspective of a large area. The nitrogen loss moduli of the 19 principal tributaries of the Yellow River, calculated from many years' data of their averaged river flux and nitrogen concentration, ranged from $0.073 \sim 1.665 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which were obviously positively related to the population and agricultural intensity of the region. The nitrogen loss moduli obtained from the mainstream data were less than those from tributaries' because of the 'area scale effect', and the nitrogen loss moduli at different stations along the mainstream of the Yellow River varied slightly. On the other hand, the nitrogen loss moduli of the Yellow River Basin increased greatly since 1990s: the 1995' s value of Toudaoguai Station in the Mid Reaches was 4 times higher than decade before, meanwhile the value of the Lower Reaches Station Huayuankou doubled from 1986 to 1996. We found that the nitrogen was leached from the Valley primarily in the dissolved form and existed in liquid phase, having little relationship with the sediment erosion modulus in the Yellow River Basin. The nitrogen loss modulus of the Yellow River Basin based on Huayuankou Station was less than that of Yangtze River based on Datong Station. The nitrogen fertilizer loss ratio (total nitrogen loss to total amount of nitrogen fertilizer applied in the Basin) tended to increase in the late 1990s in the Yellow River Basin, 12% increasing from 1997 to 1998 and 18% increasing from 1998 to 1999. The authors call on that this situation should be attached great importance to our researchers of fertilizer, researchers of environment protection and concerned governmental decision - making departments.

Keywords: the Yellow River; nitrogen loss modulus

收稿日期: 2004 - 04 - 15

基金项目: 国家自然科学基金委员会与水利部黄河水利委员会联合基金资助项目 (No. E09 - 50239010)

作者简介: 陈静生 (1932—), 北京大学教授, 博导, 从事区域环境及河流水化学研究。

联系人: 于涛, E-mail: yutao0325@sina.com

1 “氮素流失模数”的概念及研究意义

在水文学上有“径流模数”的概念,指单位时间(通常以年为单位),单位流域面积上产生的径流量。在水化学上有“离子径流模数”(又称“化学溶蚀模数”)的概念,指单位时间内从单位流域面积上流失掉的主要离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , $1/2 \text{HCO}_3^-$ 和 CO_3^{2-})的数量。在本文中应用类似概念研究了黄河流域的“氮素流失模数”。

一方面氮是生物的基本营养元素,一方面氮污染目前已扩及全球范围^[1,2,10],不少学者正致力于研究区域和全球的氮循环和氮平衡问题^[3-5]。氮素流失模数是研究区域氮循环与氮平衡的基本参数,我国此领域的研究工作尚处于起步阶段,虽然某些学者在研究农田氮肥的有效利用率时,对氮素通过地表和地下径流的流失状况曾作过某些报道^[6,7],但以广阔区域(或流域)为对象,应用水文学方法,以长期系统的水质监测数据为依据,对那里的氮素流失情况进行全面系统的研究至今尚未见报道。

黄河是我国的第二大河,黄河流域是我国重要的农业区域。新中国成立后的半个世纪来,黄河流域农田灌溉事业不断发展,化肥施用量逐年增多,大大促进了农业生产的发展,但与此同时产生了两个严重的不良生态后果:河道径流量不断减少与河水氮污染日趋严重^[8,9]。这是影响流域氮素流失模数的2个关键性因素。本文不仅研究黄河流域氮素流失模数的区域差异及原因,还研究黄河流域氮素流失模数近40年来的变化。进行这样的研究,可为区域氮循环和氮平衡的研究提供基础参数,同时也将有助于从大区域角度对我国化肥的利用效率进行评价。

2 资料和方法

从我国水利部黄河水利委员会水文年鉴上收集了黄河流域近50a的流量数据和近40a的水质数据;所缺的部分流域面积和流量数据从《中国水系大辞典》中查得;氮肥施用量数据引自各年的《中国农业统计年鉴》。

选用花园口以上黄河的19个主要支流控制站点及7个有代表性的干流站点的资料进行计算。这些站点所代表的区域覆盖黄河90%以上的流域面积。由于缺乏河流的有机氮浓度数据,本文所研究的实际上是无机氮(包括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等)的流失模数。氮素流失模数的计算按下列公式及资料:

$$\text{氮素流失模数} = (Q \times c) / A (\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$$

式中: Q 为径流量多年均值, $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$; c 为总无机氮浓度多年均值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; A 为站点以上流域面积, km^2 。

数据处理和统计检验工作在 EXCEL 和 SPSS 软件中进行。

3 结果与讨论

3.1 黄河流域氮流失模数的区域差异与原因

为查明黄河流域不同区域氮素流失状况的差别,我们选取了黄河19个主要支流控制站点的资料,分别计算了各支流流域的氮素流失模数,详见表1。按氮素流失模数数值大小,对黄河流域氮素流失强度可作如下划分:

- (1) 氮素流失模数 $< 0.1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域;
- (2) 氮素流失模数为 $0.1 \sim 0.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域;
- (3) 氮素流失模数为 $0.5 \sim 1.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域;
- (4) 氮素流失模数 $> 1.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域。

流域氮素流失模数 $< 0.1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的支流只有黄河上游的庄浪河,位于甘肃省西北部,其具体数值为 $0.073 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是此次研究中获得的最小值。

黄河上游和中游绝大部分较小支流流域的氮素流失模数在 $0.1 \sim 0.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。

流域氮素流失模数在 $0.5 \sim 1.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间的有黄河中游的几条较大支流:渭河、伊河和洛河。渭河是黄河的最大支流,渭河流经的陕西关中平原是我国主要的农业区域,氮素流失模数为 $0.658 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。伊河与洛河位于河南省北部,流域内人烟稠密,耕种指数较高,也是黄河流域的主要农业区域。氮素流失模数分别为 0.993 和 $0.614 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

流域氮素流失模数 $> 1.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的只有涑水河和伊河与洛河汇合后的伊洛河下游流域。涑水河位于山西省南部,流域面积不大,是山西省的主要棉麦种植区域,氮素流失模数为 $1.066 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。伊洛河下游区域的氮素流失模数为 $1.665 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是此次研究中获得的最大值。

从上述氮素流失模数的区域分布情况看,流域氮素流失模数的大小主要与区域的人口密度和农业生产水平有关。

表 1 黄河 19 个主要支流流域的氮素流失模数及资料依据

Table 1 Nitrogen loss moduli of the 19 principal tributaries in the Yellow River Basin

河流	所在省区	控制站点	年径流量多年均值 (1952—1990)/10 ⁸ m ³	河水总无机氮浓度 多年均值/mg·L ⁻¹	统计时间	流域面积 /km ²	氮素流失模数 /t·km ⁻² ·a ⁻¹
大夏河	甘肃	折桥	10.01	1.215	1989—1997	7 154	0.17
庄浪河	甘肃	红崖子	1.403	2.096	1989—1993	4 008	0.073
洮河	甘肃	红旗	50.9	1.203	1989—1998	25 527	0.24
大通河	青海	享堂	29.33	1.431	1989—2000	15 130	0.277
湟水	青海	民和	17.17	4.061	1989—2000	17 733	0.393
窟野河	陕西	神木	6.798	3.925	1989—2000	8 706	0.306
沁河	山西	武陟	10.11	3.824	1989—2000	12 894	0.299
清涧河	陕西	延川	1.445	3.007	1989—2000	4 080	0.106
三川河	山西	后大成	2.604	3.851	1992—2000	4 161	0.241
涑水河	山西	蒲川	2.781	21.074	1989—1998	5 496	1.066
汾河	山西	河津	12.84	11.469	1989—2000	39 471	0.373
渭河	甘肃、陕西	华县	80.48	11.022	1989—2000	134 766	0.658
无定河	陕西	白家川	12.86	2.494	1989—2000	30 261	0.106
昕水河	山西	大宁	1.572	3.434	1989—2000	4 326	0.125
延水	陕西	甘谷驿	2.195	3.949	1992—2000	7 687	0.113
北洛河	陕西	淤头	9.97	3.411	1989—1990	26 786	0.126
伊河	河南	龙门镇	12.93	2.907	1989—1990, 1999—2000	6 120	0.614
洛河	河南	白马寺	23.27	5.443	1989—1990, 1999—2000	12 761	0.993
伊洛河	河南	石灰务	31.6	9.947	1989—2000	18 881	1.665

3.2 对黄河干流主要控制站点流域氮素流失状况的总体评估

上节内容可清晰地表明,由于各支流的流域范围彼此互不重叠,故按支流资料计算所得的氮素流失模数能较好地反映支流流域之间氮素流失状况的差别。为对黄河干流各站点以上流域氮素流失的总体状况进行评估,选择了黄河干流上的 7 个代表性站点,分别计算各站点以上流域的氮素流失模数,计算结果在 0.124 ~ 0.219 t·km⁻²·a⁻¹ 之间,见表 2。将这一计算结果与前节按支流资料计算所得的结果进行比较,可以发现两个特点:按干流站点数据计算所得的氮素流失模数数值多数显著地低于按支流站点资料计算所得的数值;按干流各站点资料计算所得的氮素流失模数差异甚小。

为什么会产生这一现象呢?这与河流水质学上的“流域面积的尺度效应”有关。Meybeck, M. and Helmer, R. (1989) 曾指出,随着流域面积增大,各河流水质差异的变幅越来越小^[10]。以水中含量最高的八大离子浓度而言,对流域面积在 100 km² 以下的河流水质进行比较,可以发现各河流间多数水质参数浓度的差异可达 2 ~ 4 个数量级,而对流域面积达 10 万 km² 的河流进行相互比较,可以发现他们的水质参数浓度的差异通常在 1 ~ 2 个数量级范围内,对全球大河下游的水质相互比较时可以发现,其水质间的差异甚小。对黄河流域的氮素流失模数而言,我们所研究的上述支流的流域面积多数为数千至数万平方公里,氮素流失模数的差别小于 2 个数量级。而我们所计算的黄河干流上的站点其流域面积均达几十万平方公

表 2 按黄河 7 个干流站点资料计算所得的黄河流域氮素流失模数

Table 2 Nitrogen loss moduli of the 7 stations along the mainstream of the Yellow River

站点	多年平均流量 (1987—1997)/10 ⁸ m ³	多年平均 DIN (1989—2000)/mg·L ⁻¹	控制流域面积 /km ²	N 素流失模数 /t·km ⁻² ·a ⁻¹
循化	225.6	1.123	144 750	0.175
兰州	269.4	1.807	222 551	0.219
石嘴山	238.59	2.635	309 146	0.183
头道拐	167.8	2.710	367 898	0.124
龙门	211	3.987	497 552	0.169
三门峡	269.5	4.709	688 421	0.184
花园口	286.6	4.104	730 036	0.161

里,且下一站的流域范围包括了上一站的全部流域范围。流域范围的重叠性和下游水质对上游水质的继承性,造成了上面指出的黄河干流各站点氮素流失模数数值的特点。

但必须指出,尽管按干流各站点资料计算所得的流域氮素数流失模数的差异不大,我们仍应十分关注这种差别,因为如果按下一站点资料计算的值大于按上一站点资料计算的值,则说明这两个站点之间新增加的流域范围内的氮素流失模数增大了。如果下一站点资料计算的值小于按上一站点资料计算的值,则说明这两个站点之间新增加的流域范围内的氮素流失模数有所减小。

3.3 黄河流域氮素流失模数近 20 a 来的变化

前面在讨论黄河流域氮素流失模数的区域差异时我们曾指出,各支流流域氮素流失模数的大小与该区域的人口数量和农业生产水平有关。新中国成立后黄河流域人口增多,经济生产水平大大提高。这些对黄河流域的氮素流失模数有什么影响呢?为此,选择黄河中游的头道拐水文站(位于黄河沿程的两个最大灌区——宁夏灌区和内蒙河套灌区以下)和黄河下游的控制性水文站花园口站 2 个站点,分别计算其 1985 年以来的氮素流失模数的变化情况,见图 1 和图 2。

图 1、图 2 的曲线表明,黄河流域 10 余年来氮素流失模数不断增加,尤其 20 世纪 90 年代以来增加更为明显。2 个站点曲线的趋势统计特征前者为 $r = 0.901$, $P = 0$; 后者为 $r = 0.755$, $P = 0.007$,既随着时间变化 2 站的氮素流失模数上升趋势显著。位于黄河中游两大灌区以下的头道拐水文站以上流域 1995 年的氮素流失模数比 1985 年增加了 4 倍以上,黄河下游控制性站点 1996 年的氮素流失模数比 1986 年增加了 2 倍以上。这既说明了黄河流域近 20 a 来农业生

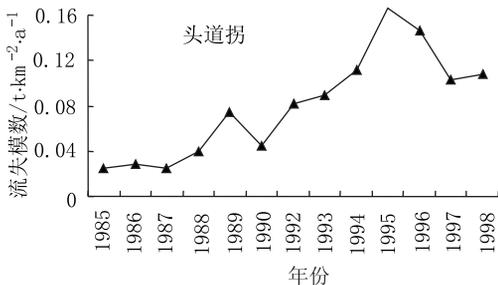


图 1 黄河中游头道拐水文站以上流域 1985—1998 年氮素流失模数的变化 ($r = 0.901$, $P = 0$)

Figure 1 Changes of nitrogen loss modulus of the Mid Reaches Station Toudaoguai from 1985 to 1998 ($r = 0.901$, $P = 0$)

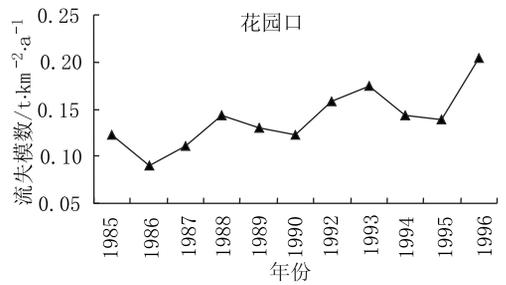


图 2 黄河下游花园口水文站以上流域 1985—1996 年氮素流失模数的变化 ($r = 0.755$, $P = 0.007$)

Figure 2 Changes of nitrogen loss modulus of the Lower Reaches Station Huayuankou from 1985 to 1996 ($r = 0.755$, $P = 0.007$)

产大发展,氮肥的施用量越来越大(以花园口站为例,图 3),也说明了我国农业施肥的管理水平仍然极为落后,使施入农田的氮肥通过地表和地下径流的流失量越来越大,统计检验表明,流域氮素流失模数与氮肥施用量呈显著正相关。此问题应引起我国有关决策部门的高度重视。对这 2 个站点的氮素流失模数的差别仍可以用“流域面积尺度效应”进行解释。

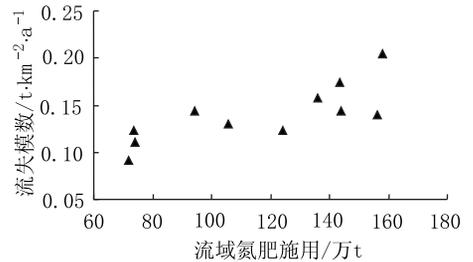


图 3 黄河花园口站以上流域氮素流失模数与流域氮肥施用量的关系 ($r = 0.782$, $P = 0.004$)

[施用量的计算以花园口以上流域所在各省的面积为权重,计算氮肥施用量之和(折纯氮),未包括位于研究站点以下的山东省的氮肥施用量]

Figure 3 Relationship between the nitrogen loss modulus and the nitrogen fertilizer application rate at Huayuankou Station and its upper drainage ($r = 0.782$, $P = 0.004$)

[the nitrogen fertilizer application rate (converted into N form) calculated according to the weight of each province's area in the Yellow River Valley, not including that of Shandong province for it's in the lower reaches of the studied station]

3.4 黄河流域氮素流失模数与泥沙径流模数的关系

黄河以多泥沙著称,鉴于此,比较了黄河上述 19 个支流流域的氮素流失模数和泥沙径流模数的关系,见表 3。统计检验表明,两者之间无明显相关关系,说明从黄河流域流失的氮主要是以溶解态形式存在于水相中的氮。

3.5 黄河流域氮素流失模数与长江流域氮素流失模

数的比较

长江和黄河分别是我国的第一和第二大河。限于资料目前尚无可能对长江和黄河各支流流域的氮素流失模数进行全面的比较研究,这里仅以两河下游最主要的控制性站点(黄河花园口站与长江大通站)的资料为依据,对其全流域氮素流失模数的总体情况进行比较。黄河花园口站控制黄河流域 96% 的面积,其下为地上河,基本上无支流汇入,可以代表全流域的总体状况。长江大通站位于长江下游安徽省境内,此处所以成为长江水文的控制性站点,是因为此站以下长达 600 km 的长江均受到我国东海潮汐的影响,难

以测量到长江的年总径流量。表 4 列举了反映长江与黄河流域氮素流失模数总体状况的数据。注意:此处黄河的数据不包括山东省的情况,长江的数据不包括大通站以下我国工农业最发达的江苏省和上海市的情况。

将长江的数据与黄河的数据相比较,不难发现,无论是流域氮素的流失通量还是氮素流失模数均为长江大于黄河(流失模数高出近 15%),显而易见,这与长江流域的人口数量和工农业生产水平超过黄河流域有关。

3.6 对黄河流域与长江流域氮肥总体流失率的估算

表 3 黄河 19 个支流流域的泥沙径流模数

Table 3 Sediment flux moduli of the 19 tributaries of the Yellow River

河流	悬浮物平均含量 /g · L ⁻¹	泥沙径流模数 /t · km ⁻² · a ⁻¹	河流	悬浮物平均含量 /g · L ⁻¹	泥沙侵蚀模数 /t · km ⁻² · a ⁻¹
大夏河	12.1	1 693	汾河	158.26	5 148
庄浪河	2.03	71	渭河	309.22	18 466
洮河	28.39	5 661	无定河	2.44	104
大通河	0.24	47	昕水河	1.66	60
湟水	0.89	86	延水	9.05	258
窟野河	2.09	163	北洛河	97.29	3 621
沁河	13.28	1 041	伊河	6.68	1 411
清涧河	4.45	158	洛河	2.39	436
三川河	6.72	421	伊洛河	4.86	813
涑水河	46.82	2 369			

表 4 长江与黄河流域氮素流失模数比较

Table 4 Comparisons between the nitrogen loss modulus of the Yellow and that of the Yangtze River Basin

河流	站点	流域面积/10 ⁴ km ²	站点控制的流域面积	站点控制的氮素通量/t · a ⁻¹	氮素侵蚀模数/t · km ⁻² · a ⁻¹
黄河	花园口	75.2	96%	99 327	0.161
长江	大通	180	95%	322 643 ^[11]	0.189

表 5 1997—1999 年黄河流域与长江流域的氮肥总体流失率

Table 5 Total loss ratio of the nitrogen fertilizer in the Yellow and Yangtze River Basin (1997 - 1999)

河流	统计时间	控制站点	氮肥施用量(折合为纯氮,万 t)	总无机氮流失通量/t	氮肥流失率/%
黄河	1997	花园口	144.071	68 153.16	4.8
	1998		156.261	82 370.86	5.3
	1999		157.926	98 782.41	6.3
长江	1997	大通	593.019	322 643	5.4

这里的“流域氮肥总体流失率”是指从黄河、长江全流域流失掉的氮素总量占该流域氮肥总施入量的比例。为此分别计算黄河流域 3 a(1997, 1998 和 1999)的情况与长江流域 1 a(1997)的情况,见表 5。长江流域氮肥施用量也按流域内各省区面积权重统计,不包括江苏省和上海市的情况。从对同一年(1997)资料的比较中可清晰地看出,长江流域氮肥的总体流失率(5.4%)大于黄河流域氮肥的总体流失率(4.8%),

高 12% 左右。但更为醒目的是黄河流域的氮肥流失率自 1997 年以后仍在大幅度增加(从 1997 年的 4.8% 增至 1999 年的 6.3%),黄河流域 1998 年的氮素流失率比 1997 年增加 12%。1999 年的氮素流失率比 1998 年增加 18%。

为此在这里再一次呼吁,我国氮肥流失率逐年增高和增长速度越来越快的情况,应引起我国农田肥料工作者、环境保护工作者和政府高层决策部门的高度

重视。

4 结论

(1)按多年年径流量均值和多年河水氮浓度均值计算所得的黄河19个主要支流的流域氮素流失模数在 $0.073 \sim 1.665 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,氮素流失模数的大小与区域人口和农业生产水平存在正相关性。

(2)由于存在“流域面积尺度效应”,使按干流数据计算得到的黄河流域的氮素流失模数显著地小于按支流资料计算得到的氮素流失模数;由于干流各站点控制的流域范围具有重叠性以及下游水质对上游水质有继承性,使按干流各站数据计算得到的氮素流失模数数值间差异不大。

(3)20世纪90年代以后黄河流域的氮素流失模数大大增加。中游头道拐站以上流域1995年的氮素流失模数比1985年增加4倍以上,下游花园口站以上流域1996年的氮素流失模数比1986年增加2倍以上。

(4)黄河流域流失的氮主要是以溶解态形式存在于水相中的氮素,流域氮素流失模数与泥沙径流模数之间无明显关系。

(5)长江流域的氮素流失模数显著地大于黄河流域。

(6)黄河流域的氮素流失率(指黄河全流域流失掉的氮素总量占该流域氮肥总施入量的比例)在20世纪90年代后期有快速增加的趋势:1998年比1997

年增加12%,1999年又比1998年增加18%。

参考文献:

- [1] Moffat A S. Global nitrogen overload problem grows critical[J]. *Science*, 1998, 279: 988 - 989.
- [2] Benjamin L Peierls, Nina F Caraco, Mihael L Pace. Human influence on river nitrogen[J]. *Nature*, 1991, 350(4): 386 - 387.
- [3] Michel Meybeck. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world river[J]. *American Journal of Science*, 1982, 282: 401 - 450.
- [4] Krug E C, Winstanley D. The need for comprehensive and consistent treatment of the nitrogen cycle on nitrogen cycling and mass balance studies: terrestrial nitrogen cycle[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, (293): 1 - 29.
- [5] 晏维金, 章申, 王嘉慧. 长江流域氮的生物地球化学循环及其对输送无机氮的影响——1968—1990年的时间分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(5): 505 - 514.
- [6] Xing G X & Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural field to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57: 67 - 73.
- [7] Duan Shuiwang, Zhang shen & Huang Hongyu. Transport of dissolved inorganic nitrogen from the major rivers to estuaries in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57: 13 - 22.
- [8] 陈静生, 李荷碧, 夏星辉, 等. 近30年来黄河水质变化趋势及原因分析[J]. *环境化学*, 2000, 19(2): 97 - 102.
- [9] 于涛, 陈静生. 农业发展对黄河水质和氮污染的影响——以宁夏灌区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, (5).
- [10] Meybeck M and Helmer R. The quality of rivers from pristine stage to global pollution[J]. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol (Global Planet Change Sect)*, 1989, 75: 283 - 309.
- [11] 沈志良, 刘群, 张淑美, 等. 长江流域氮收支[J]. *AMBIO*, 2003, 32(1): 65 - 69.