

复杂景观中营养型非点源污染物时空变异特征分析

陈利顶, 丘君, 张淑荣, 傅伯杰(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘要:非点源污染的形成不仅受到地表物质来源、景观格局的影响,同时还受到土壤侵蚀过程、降雨过程、灌溉过程、地表和地下水文过程的影响。由于影响非点源污染的因子复杂多样,从而导致它的时空变化较大。正确认识非点源污染的时空变异特征对于科学布设监测点和研究它的变化规律具有重要意义。本文通过野外定点监测,研究了非点源污染的时空变异。结果发现:①干旱年份各种污染物空间变异小于降雨正常年份。②对于不同污染物,无论在干旱年份还是正常年份,地表水中固体悬浮颗粒物的空间变异均较大,其他污染物的空间变异相对较小。③对于固体悬浮颗粒物,干旱年份不同水文期之间的空间变异比较接近,而正常年份的空间变异不同水文期之间差异较大。④非点源污染季节变异较小的监测点主要出现在具有稳定水源和地表径流季节变化较小的地区;而非点源污染空间变异较大的监测点主要出现在山区河流上游地表径流季节变化明显、农业用地面积较大且地表径流季节变化较大和明显受到点源污染影响的地区。

关键词:非点源污染;营养盐污染物;时空变异;复杂景观

中图分类号:X171 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)03-06-0085

Tempo spatial Variation of Non point Source Pollutants in a Complex Landscape

Chen Liding, Qiu Jun, Zhang Shurong, Fu Bojie (Research Center for Eco Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The occurrence of non-point source pollution, is not only related to its sources, landscape pattern, but also depends on the factors such as soil erosion, rainfall, irrigation, surface and underground run-off. Thus non-point source pollution is characterized by in nature tempo spatial variation. In this paper, the tempo spatial variation of non-point source pollution due to nutrient salts in a complex landscape was studied by field water sampling and analysis. The results were as follow: ① Spatial variability of all nutrient concentration in rainfall-deficit year was generally smaller than that in normal rainfall year with different level for different pollutants in a single period. ② Spatial variability of solid particles in surface water was much marked than the other pollutants studied both in the rainfall-deficit year and in the normal rainfall year, while the smaller variation in different water periods of a year in the normal rainfall year. ③ Apparently, those areas with stable run-off had a small seasonal variation of non-point source pollution. However, large seasonal change occurred mainly in the upper reach of river where run-off changed seasonally, and/or where farmland dominated, as well as where point-source pollution occurred.

Key words: non-point source pollution; nutrient salt; tempo spatial variation; complex landscape

非点源污染(Non-point Source Pollution)与点源污染相对应,是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等),引起的水体污染^[1~3]。长期以来非点源污染形成的机理及其控制途径一直是困扰科学家的首要问题^[2~4]。非点源污染的形成不仅与物质来源,如化肥农药的使用、垃圾的堆放有关,而且与地表景观的性质,如流域土壤特征、土地利用/覆盖类型及其空间分布特征,同时还

受土壤侵蚀过程、降雨过程、灌溉过程、地表和地下水文过程的影响^[4~11]。而非点源污染对农业生产、水资源、流域水文过程和水生生物栖息环境形成的危害愈来愈严重^[2,13]。由于缺乏有效的监测途径和研究手段,在研究非点源污染动态变化方面进展缓慢。目前结合地理信息系

基金项目:国家自然科学基金面上基金项目(49971072)和重点项目(49831020)

作者简介:陈利顶(1965~),博士,研究员,主要从事景观生态学、土地利用变化及其环境效应方面的研究。

收稿日期:2002-07-18;修订日期:2002-12-17

统模拟研究非点源污染的空间分布及其与景观因子之间的关系是比较有效的手段,但往往是定性地评价非点源污染空间的可能变化规律,尚不能做到准确评价和预测非点源污染的空间分布特征^[14-19].本文旨在通过野外定点对地表水体的监测,研究非点源污染指标的时空变异特征,为进一步监测非点源污染提供科学依据.

1 研究地区概况

于桥水库流域位于蓟运河上游,北纬 39°56'~40°23'与东经 117°26'~118°12'之间.地跨河北、天津两地,面积 2052 km².该流域属于温带大陆季风型半湿润气候.年均温度 10.4~11.5℃,多年平均降雨量为 748 mm,主要集中在 7~9 月份.流域内地形复杂,主要有中低山、丘陵盆地和平原组成,其中海拔 500 m 以上的山地占全流域面积的 24.5%,不同集水小区之间地形地貌、土地利用/覆被和人类活动特征差异较大,形成了复杂的景观特征(表 1).于桥水库是引滦入津工程的重要调蓄水库,同时又是天津市工农业和生活用水的主要水源地,其水体富营养化将直接影响到天津市的工农业用水和蓟运河以及渤海湾水体的水质^[20].其上游遵化市地区以种植业为主,具有较高的农业非点源污染危险.研究地区基本概况如图 1 所示.

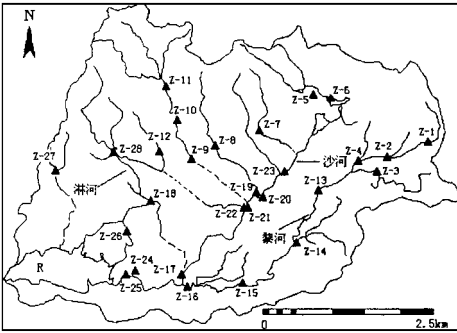


图 1 研究地区位置
Fig. 1 Location of the studied area

2 研究方法

2.1 野外采样分析

根据于桥水库流域水系特征将该区划分为 28 个控制小区,其主要特征如表 1 所示,不同控制小区之间差异较大.在每个控制小区的下

游出口处设置水质取样控制点,分别于 1999、2000 和 2001 年的枯水期(6 月)、丰水期(8 月)和平水期(10 月)同一时间进行采样分析,每次取水样 1000 mL,密封保存至次日送去当地环境监测站检测.检测的污染物包括 pH 值、COD_{Mn}、BOD₅、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、磷酸盐及固体悬浮颗粒物(TSS)7 项.pH 值采用玻璃电极法,利用酸度计测定;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法,利用滴定管测定;BOD₅采用稀释接种法,通过培养箱处理利用滴定管测定;氨氮采用钠氏试剂比色法,硝态氮的测定采用酚二磺酸光度法,磷酸盐采用钼钼酸分光光度计测定,这 3 种污染物均用 721 分光光度计测定(水样中磷的检出下限为 0.025 mg/L).TSS 采用光度法,利用悬浮物混浊度测定仪测定.

2.2 统计分析方法

在分析非点源污染时空变异特征时,由于磷酸盐的浓度大多情况下低于测定的下限,主要选取了 COD_{Mn}、BOD₅、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TSS 作为分析指标.在分析各种非点源污染的空间变异时,分别以各种污染物和各监测点为研究对象,比较不同监测点之间的同一种污染物在某一季节的空间变异特征;季节变异特征是针对某一监测点分析不同水文期之间各种污染物浓度的变化,计算方法如下:

$$\overline{PP_i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{ij} \tag{1}$$

$$PV_i = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - \overline{PP_i})^2 / \overline{PP_i}^2} \tag{2}$$

$$\overline{PS_s} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_{it} \tag{3}$$

$$SP_j = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n (P_{it} - \overline{PS_s})^2 / \overline{PS_s}^2} \tag{4}$$

其中, P_{ij} 为第 i 种污染物在第 j 个监测点的测定浓度, $\overline{PP_i}$ 为所有监测点第 i 种污染物浓度某一水文期的平均值, P_{it} 为各种污染物在不同水文期的浓度, $\overline{PS_s}$ 为第 i 种污染物浓度不同季节(3 年 6 个水文期)的平均值; m 表示监测点的

表 1 于桥水库流域各小区土地利用及其他基本特征¹⁾

Table 1 Land use/cover and other attributes of each sub-watershed in Yuqiao Reservoir Catchment											
控制 小区	土地利用类型/ %					多样 性指 数	单位土地面积化肥 农药使用量/ kg·hm ⁻²		人口 密度 /人 ·km ⁻²	其他项目	
	林地	草地	耕地	城镇 用地	其他		化肥	农药		地形特征	小流域水系特征
Z-1	90.53	3.93	4.17		1.37	0.18	39.33	0.18	216	丘陵山区	引滦入津河道,常流水
Z-2	46.88	31.45	16.34	5.27	0.06	0.51	250.19	1.39	457	丘陵山区	引滦入津河道,常流水
Z-3	59.17	22.85	14.38	3.44	0.16	0.46	235.50	1.98	416	丘陵山区	季节性河流
Z-4	16.93	36.88	39.54	6.65		0.53	805.05	3.66	323	丘陵平原	引滦入津河道,常流水
Z-5	90.65	3.33	4.11	1.78	0.13	0.18	39.99	0.11	207	低山区	季节性河流,有水库
Z-6	87.67	2.43	3.6	0.21	6.09	0.22	35.83	0.09	210	丘陵盆地区	季节性河流
Z-7 ¹⁾	84.84	6.72	7.51	0.4	0.53	0.25	153.61	0.36	298	低山区	季节性河流
Z-8 ¹⁾	27.42	53.16	18.08	1.33	0.01	0.46	421.72	0.66	316	低山区	季节性河流
Z-9	16.71	39.99	35.74	4.17	3.39	0.56	836.70	16.58	407	低山区	季节性河流,水库下方
Z-10	8.09	78.29	9.02	0.64	3.96	0.34	284.59	0.36	437	低山区	季节性河流,有水库
Z-11	54.85	42.64	2.2		0.31	0.35	69.44	0.09	185	中低山区	季节性河流
Z-12 ¹⁾	5.51	81.46	11.59	1.42	0.02	0.28	235.63	0.49	457	中低山区	季节性河流
Z-13 ¹⁾	31.58	16.56	41.55	9.8	0.51	0.56	1023.17	6.37	508	丘陵平原区	引滦入津河道,常流水
Z-14	24.38	7.24	53.31	14.85	0.22	0.51	1133.17	4.38	561	丘陵平原区	引滦入津河道,常流水
Z-15	42.92	2.39	45.28	9.41		0.45	1002.5	4.52	486	丘陵平原区	引滦入津河道,常流水
Z-16	12.01	0.4	71.32	15.51	0.76	0.37	1787.72	4.65	580	丘陵平原区	引滦入津河道,常流水
Z-17	31.77		57.09	11.07	0.07	0.41	1254.81	2.56	486	缓丘平原区	沙河下游,常有水
Z-18	61.26	18.18	17.99	2.65		0.44	280.03	0.45	299	低山丘陵盆地	季节性河流,有水库
Z-19	0.32		85.33	14.35		0.19	1542.77	27.94	507	丘陵平原	季节性河流
Z-20 ¹⁾	37.2	9.82	36.86	15.96	0.16	0.55	798.47	10.16	945	山间盆地区	沙河中游,常有水,遵化市下方
Z-21	40.9		48.74	10.36		0.41	865.83	17.23	550	山间盆地区	沙河中游,常有水,遵化市下方
Z-22	11.61	5.61	71.91	9.76	1.11	0.40	1309.33	14.10	422	山间盆地区	沙河中游,常有水,季节性明显
Z-23	34.84	0.29	48.96	15.61	0.3	0.45	1102.51	6.41	667	山间盆地区	沙河中游,常有水,遵化市下方
Z-24 ¹⁾	25.31		50.38	15.33	8.98	0.59	1496.219	5.556	419.3	缓丘平原区	州河,常有水,靠近于桥水库
Z-25 ¹⁾	14.23	22.80	33.52	10.64	18.81	0.75	618.69	2.339	487	缓丘平原区	州河,常有水,靠近于桥水库
Z-26	58.46	8.03	28.4	5.09	0.02	0.45	787.55	2.96	393	缓丘平原区	州河,常有水,靠近于桥水库
Z-27	87.95	12.05				0.16	34.76	0.10	225	低山丘陵区	季节性河流
Z-28	59.78	22.48	17.59	0.15		0.42	542.61	1.81	284	低山丘陵区	季节性河流

1) 由于地表径流季节变化大或因其他原因,这些小流域有较多水文期末未能采到水样而获得各项污染物的监测值.因此,在分析空间和季节变异时,未考虑这些监测点.

数目(21个), n 为污染物的数目, PV_i 表示第*i*种污染物浓度在空间变异的大小, SP_j 表示第*j*个监测点非点源污染的季节变异.

3 结果与讨论

3.1 非点源污染物的空间变异

表2显示了于桥水库流域不同年份不同水文期各种污染物在空间上的变异特征.从中可以看出如下特征:

(1) 在年际变化上,比较明显的一个变化规律是干旱年份各种污染物的空间变异要比降雨较多年份的小.这是因为降雨和地表径流过程是非点源污染形成的一个重要过程,但由于

空间景观类型的变化,导致在降雨-径流过程中的非点源污染的变化随机性增大;而在干旱年份,由于降雨较少和地表径流不活跃,地表水质主要受到地下径流的影响,经过土层的过滤作用,导致地表水中污染物的浓度空间变异性相对较小.不同污染物浓度空间变异的大小反映了各控制小区向主要水体输送污染物强度和通量的空间不确定性,在干旱年份主要污染物在不同小区之间的输送通量相对差异较小,而在降雨较多年份不同小区之间污染物的通量差异较大.

(2) 在季节变化上,并没有明显的变化规

律.干旱年份(1999),除了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在平水期的空间变异性呈现下降趋势外,其他 4 种污染物的空间变异性从枯水期、丰水期、平水期,均呈明显上升趋势;正常年份(2000),各种污染物的空间变异性差异较大, COD_{Mn} 在平水期的空间变异性最大, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在枯水期的空间变异较大,而 BOD_5 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TSS 的空间变异性在丰水期出现最大.而在降雨较多的年份(2001), COD_{Mn} 、 BOD_5 在平水期的空间变异性最大, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在枯水期的空间变异较大,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

和 TSS 的空间变异性在丰水期出现最大.

(3) 对不同污染物来说,一个明显的特点是地表水中 TSS 的空间变异最大.但在干旱年份空间变异性相对较小,而且不同水文期之间的空间变异性比较相近;而在正常年份 TSS 的空间变异较大,而且不同季节之间差异较大.这种空间变异的季节规律反映出 TSS 在不同季节和不同控制小区中的通量和强度变化较大,而其他污染物的通量和强度在空间和季节上的变化相对较小.

表 2 于桥水库流域各项污染物空间变异特征

Table 2 Spatial variation of each pollutants in Yuqiao Reservoir Basin

指标	1999 年				2000 年				2001 年			
	枯水期 (6 月)	丰水期 (8 月)	平水期 (10 月)	平均值	枯水期 (6 月)	丰水期 (8 月)	平水期 (10 月)	平均值	枯水期 (6 月)	丰水期 (8 月)	平水期 (10 月)	平均值
COD_{Mn}	0.700	0.559	1.146	0.802	1.069	1.03	1.608	1.236	2.965	2.928	0.238	2.044
BOD_5	0.194	0.237	0.480	0.303	0.345	0.523	0.333	0.400	0.539	0.329		0.434
氨氮	0.157	0.148	0.052	0.119	0.381	0.082	0.092	0.185	2.459	0.542	0.291	1.097
硝态氮	0.005	0.156	0.400	0.187	0.177	0.601	0.232	0.337	0.149	0.56	0.724	0.478
TSS	1.243	1.362	1.907	1.504	4.214	18.160	2.643	8.339	2.941	0.53	38.75	14.074
水溶性氮	0.158	0.254	0.414	0.275	0.404	0.604	0.229	0.412	2.416	0.534	0.771	1.240

3.2 非点源污染季节变异

表 3 显示了于桥水库流域不同监测点之间非点源污染的季节变异特征.根据表 3 可以将研究地区 21 个监测小流域非点源污染空间变异值的 3 年平均值,分为下面 6 类(表 4).图 2 和图 3 显示了 2000 年 8 月份所有监控点不同污染物浓度的变化特征.

从表 4 可以反映出以下特点:

(1) 引滦入津河道上的监测点:非点源污染季节变异可以分为 2 大类,其一是季节变异较大的监测点,如 Z-14 和 Z-16.这 2 个监测点主要位于 2 条比较大的支流汇入黎河的下方,监测值所反映出的非点源污染特征除了受引滦入津水质季节变化影响外,还明显受到 2 条支流地表径流的影响,因而出现了较大的季节变异.对于其他监测点来说,如 Z-1,Z-2,Z-4,由于

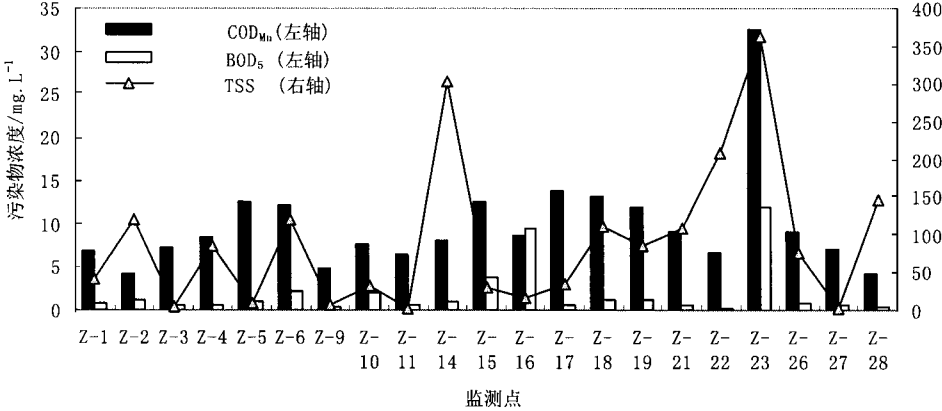


图 2 研究地区各监控点 COD_{Mn} 、 BOD_5 和 TSS 浓度比较(2000 年 8 月)

Fig. 2 Comparison of the concentration of COD_{Mn} 、 BOD_5 and TSS in the studied area in August of 2000

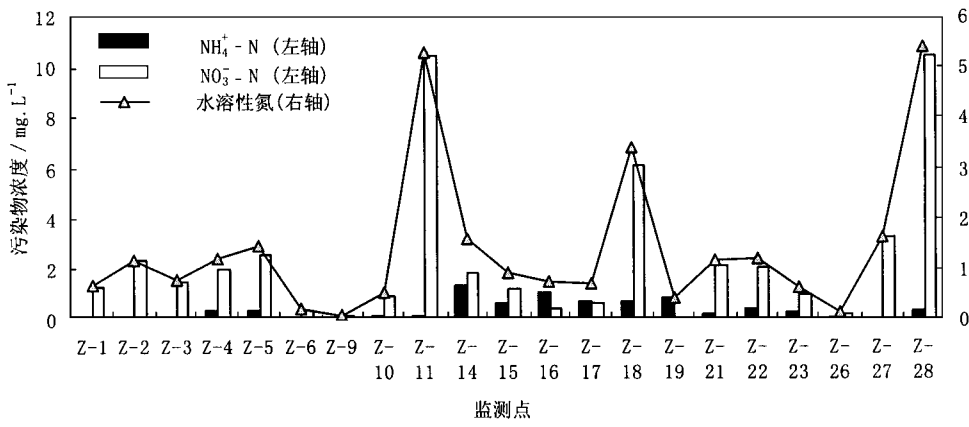


图 3 研究地区各监控点 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和水溶性氮浓度比较 (2000 年 8 月)

Fig. 3 Comparison of the concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and soluble water nitrogen in the studied area in August of 2000

主要受到引滦入津引水水质季节动态变化的影响,表现出的季节变异相对较小.同时除了 Z-15 监测点的监测值偏低外,黎河上的监测点的季节变异从上游向下游出现增大趋势.反映出黎河作为输水的主要通道,由于受到沿途地区地表径流的影响,其下游地区各种污染物的通量和强度的季节变化明显大于上游地区.

表 3 复杂景观中非点源污染指标季节变异特征

Table 3 Seasonal variation of non-point source pollution in complex landscape

监测点	季节变异值	监测点	季节变异值	监测点	季节变异值
Z-1	1.37	Z-10	1.14	Z-19	1.49
Z-2	1.37	Z-11	1.55	Z-21	1.67
Z-3	1.83	Z-14	1.62	Z-22	1.82
Z-4	1.46	Z-15	1.20	Z-23	1.47
Z-5	0.99	Z-16	1.72	Z-26	1.59
Z-6	1.60	Z-17	1.09	Z-27	1.27
Z-9	1.56	Z-18	1.39	Z-28	1.59

(2) 其他地区非点源污染季节变异较小的监测点出现在具有稳定水源的地区.如监测点 Z-5、Z-10、Z-17、Z-18、Z-27、Z-5、Z-10、Z-18、Z-27 均为修建的水库或水塘,平时一般有一定的水量,对不同季节带来的污染物可以起到一定的稀释作用,缓和了非点源污染的季节动态变化,因此非点源污染季节变异相对较小.Z-17 位于沙河的下游,平时因有地下径流补给,地表水量较大,因此也出现了较小的季节变异.这种监测

点控制的地区污染物的通量和强度在季节上变化相对较小.

(3) 非点源污染季节变异较大的监测点主要出现在 3 类地区:①山区河流上游地表径流季节变化较大的地区;如 Z-3、Z-11、Z-6、Z-28,这些监测点主要位于山区河流的上游,地表径流的季节变化较大;②农业用地面积较大而且地表径流季节变化较大的地区;如 Z-9、Z-19、Z-22,这些监测点一般农耕地的面积占有较大的比例,而且地表径流的季节变化较大.监测点 Z-9 尽管位于研究地区的中部地区,但由于在其上方建有上关水库(监测点 Z-10),枯水期和平水期地表径流较少,雨季地表径流明显增多.③明显受到点源污染影响的地区,如监测点 Z-21、Z-23、Z-26,监测点 Z-21、Z-23 均位于遵化市的下游地区,城市工业和生活污水直接导致枯水期和平水期各种污染物的浓度明显偏高,但在丰水期由于大量地表径流的稀释作用,污染物的浓度大幅度下降,由此出现了较为明显的季节变化;Z-26 位于于桥水库库岸附近,库边网箱养鱼和静水回灌导致在枯水期和平水期时的污染物浓度较高,但在丰水期时大量地表径流的汇入,使得各种污染物的浓度急剧下降,出现了较明显的季节变化.这类地区各种污染物的通量和强度随着季节的变化也会出现较大的季节变化,对于区域非点源污染控制来说带来一

定的困难.

表 4 研究地区非点源污染季节变异类型

Table 4 Classification of the studied area based on seasonal variation of non-point source pollution

分类	季节变异值范围	包括的小流域
I	≥1.80	Z-3 ;Z-22
II	1.60 ~ 1.80(含 1.60)	Z-6 ;Z-14 ;Z-16 ;Z-21
III	1.40 ~ 1.60(含 1.40)	Z-4 ;Z-9 ;Z-11 ;Z-19 ;Z-23 ;Z-26 ;Z-28
III	1.20 ~ 1.40(含 1.20)	Z-1 ;Z-2 ;Z-18 ;Z-15 ;Z-27
III	1.00 ~ 1.20(含 1.00)	Z-10 ;Z-17
IV	<1.00	Z-5

4 结 语

(1) 干旱年份各种污染物的空间变异要比降雨正常的年份小.而在季节变化上,并没有明显的变化规律,不同的污染物表现出不同的变化规律.

(2) 对于不同污染物来说,无论在干旱年份还是在正常年份,一般是地表水中 TSS 的空间变异较大,其他污染物的空间变异相对较小.对于 TSS 来说,干旱年份不同水文期之间的空间变异性比较相近,而正常年份的空间变异较大.

(3) 非点源污染季节变异较小的监测点主要出现在具有稳定水源和地表径流季节变化较小的地区.

(4) 而非点源污染季节变异较大的监测点主要出现在 3 类地区:① 山区河流上游地表径流季节变化明显的地区;② 农业用地面积较大而且地表径流季节变化较大的地区;③ 明显受到点源污染影响的地区.

正确认识非点源污染的时空变异特征对于科学布设水质监测点和研究它的变化规律具有重要意义.

参考文献:

1 Alm A L. Non-point Sources of Pollution. Environmental Science and Technology, 1990, 24(7):967.

2 Line D E et al. Nonpoint sources pollution. Wat. Environ. Res., 1998, 70(4): 895 ~ 911.

3 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染管理及控制.环境科学,1998,19(5):87 ~ 91.

4 陈利顶,傅伯杰.农田生态系统管理与非点源污染.环境科学,2000,21(2):98 ~ 100.

5 Burwell RE, Timmons DR, Holt RR. Nutrient transport in surface runoff as influenced by soil cover and seasonal periods. Soil Sci. Soc. Am. Proc.,1975,39:523 ~ 528.

6 Haycock NE, Pinay G. Groundwater nitrate dynamics in grass an poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. J. Environ. Quality, 1993, 22:273 ~ 278.

7 Johnes PJ, Heathwaite AL. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. Hydrol. Proc., 1997,11:269 ~ 286

8 Peterjohn WT, Correll DL. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. Ecology, 1984, 65:1466 ~ 1475.

9 Troiano J et al. Influence of a amount and method of irrigation water application on leaching of Atrazine. J. of Environ. Qual., 1993, 22:290 ~ 298.

10 李俊然,陈利顶,郭旭东,傅伯杰.土地利用结构对非点源污染的影响.中国环境科学,2000,20(6):506 ~ 511.

11 鲍全盛,王华东.我国水环境非点源污染研究与展望.地理科学,1996,16(1):66 ~ 71.

12 Pearce R A et al. Efficiency of grass buffer strips and vegetation height on sediment filtration in laboratory rainfall simulation. J. Environ. Quality, 1997,26:139 ~ 144.

13 周健.试论农业非点源污染的危害.农业环境保护,1990,9(1):22 ~ 24.

14 Dennis L Corwin et al. GIS-based modeling of non-point source pollutants in the vadose zone. J. Soil & Water Conserv., 1998,53(1):75 ~ 88.

15 Engel BA et al. Non-point source pollution modeling using models integrated with geographic information systems. Water Sci. Technol.,1993, 28(3 ~ 5): 685 ~ 690.

16 He C, Riggs JF, Kang YT. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality. Water Resource Bulletin,1993,29(6):891 ~ 900.

17 Leonard RA, Knisel WG, Sull DA. Gleams: groundwater loading effects of agricultural management systems. Trans. ASAE, 1987,30(5):1403 ~ 1418.

18 Tim US, Jolly R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated Geographic Information Systems and hydrologic/ water quality model. J. Environ. Qual., 1994,23:25 ~ 35.

19 李怀恩.流域非点源污染模型的建立与应用实例.环境科学学报,1997,17(2):141 ~ 147.

20 王刚,郭柏权.于桥水库水体状况分析与污染防治对策.城市环境与城市生态,1999,12(2):27 ~ 28.