

河网区水污染控制影响因素诊断分析

石 全¹, 张建华², 王会容³, 张玉珍⁴, 颜志俊³, 张 森³, 沙海明³

(1. 六安市水利局, 安徽 六安 237061; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029;

3. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

4. 南京市水务局, 江苏 南京 210036)

摘要: 对我国河网区进行分类, 提出河网区水污染控制影响因素识别方法和定量诊断分析方法, 并以太湖流域河网区为例, 分析水污染控制关键影响因素, 提出相应的水污染控制措施。

关键词: 河网区; 水污染控制; 因果分析; 主成分分析

中图分类号: X143

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 04-0022-06

Diagnosis and analysis of factors affecting water pollution control in river network area

SHI Quan¹, ZHANG Jianhua², WANG Huirong³, ZHANG Yuzhen⁴, YAN Zhijun³, ZHANG Sen³

(1. Lu'an Water Conservancy Bureau, Lu'an 237061, Anhui;

2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu;

3. Hydrology and Water Resources and Hydraulic Engineering State key Laboratory of Nanjing Hydraulic Research Institute science, Nanjing 210029, Jiangsu;

4. Nanjing Water Affairs Bureau, Nanjing 210008, Jiangsu)

Abstract: The river network area in China was classified. The identification method and quantitative diagnosis method of influencing factors of water pollution control in river network area were put forward. Taking the drainage network area of Taihu River Basin as an example, the key factors affecting water pollution control were analyzed, and the corresponding water pollution control measures were put forward.

Key words: river network area; water pollution control; causal analysis; principal component analysis

1 河网区分类及特征

1.1 河网区分类

河网区主要指呈网状结构, 同时具有一定空间范围的网状水系。由于我国地形多样, 地质构造较为复杂, 河网区的类型也是多种多样, 河网区主要是由干流及其附近的支流组成, 如有湖泊与河流相通, 湖泊也是该河网区的一部分。按照河流

位置与流向、流经区域、支流分布、上下游情况及是否受潮汐影响等因素, 我国河网区分为感潮河网区和非感潮河网区 2 大类。

(1) 感潮河网区。河网内部主要河流下游与海洋交汇、受潮汐流影响的河网区称为感潮河网区。根据感潮河网区内部主要河流规模、水文特征及其附近支流的密集程度等因素, 感潮河网区又分为大型感潮河网区和一般感潮河网区 2 类。我国

收稿日期: 2018-01-22

作者简介: 国家重点研发计划课题(2017YFC0403506); “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAD21B03); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(Y515016)。

作者简介: 石全(1982-), 男, 本科, 工程师, 主要从事水资源水环境管理保护工作。

大型感潮河网区主要有太湖流域河网区和珠江三角洲河网区;一般感潮河网区主要有闽江河网区、温黄平原河网区、韩江三角洲河网区等。

(2) 非感潮河网区。非感潮河网区指不受潮汐影响,处于江河中上游地区,一般有湖泊与河流相通的河网区。非感潮河网区由一个或若干个树状河网组成,对于一般树状分布河网,上一级河道总是汇入至下一级河道,位于河道下游断面的流量总是由其上游汇集而至。我国非感潮河网主要有鄱阳湖河网区、洞庭湖河网区、成都平原河网区等。

1.2 河网区主要特征

(1) 河网自然特征。河网地区一般地势平坦,河网密布,纵横交错,河漫滩发育,河床较浅,低坡平缓。网状河流结构是河网地区的典型地理特征,网状河流具有比降较小、相互通连、河道稳定及具有非常小的坡降和河道宽深比的基本特点。我国东部平原河网地区,大部分地区受到潮汐的影响,受潮汐影响的区域,流向、流态呈现随机性变化,易使污染物在河道往复传播,充分混合,从而影响整片区域。

(2) 水文水环境特征。河网区一般水量丰富、流速平缓、流向不定、水质较差。河流流速平缓,水动力条件不足,水体自净能力较差,易发生水环境污染。河网地区人口密集,工农业发达,产生的污水也多。天然的地貌造就了河流纵横交错,水流相互通连,在潮汐作用下,水流往复运动,污染物极易传播,蜿蜒曲折,河道比降小,水流动力严重不足,污染物难以迅速排出,容易累积水体遭受污染^[1]。

(3) 人工干预和调节影响大。河网区河流多受人工节制,水闸工程分隔、调控便利、流动受限。高度的人工控制性,给环境流量的调节带来了正负两面的影响,正面影响是河流水位抬高、槽蓄水量增加等;负面影响是由于水闸的分隔,河流的连续性受到破坏,降低了水体的流动性,自净能力降低等。

2 水污染控制影响因素分析方法

2.1 影响因素识别方法

(1) 因果分析图法。因果分析图是逐层深入地分析问题产生原因的有效根据,由质量特征、要因、主干、支干等组成,主要通过对重点影响因素

的筛选,结合各因素的特征加以分析,分类后进行整理归纳,使之形成层次分明、条理清楚、一目了然的图形。河网区水污染排放主要问题的原因,可能出现某种问题或呈现某种状态的原因多种多样,通过采用因果分析图法,对河网区水污染排放可能影响因素或存在问题,采用图示的方法,逐层深入排查可能原因,确定主要影响因素,进而针对性地提出对策和措施,达到水污染物的有效控制,改善河网区水质。

(2) 河网区水污染控制影响因素分析图绘制。明确河网区水污染排放所要解决的问题和结果。首先由左至右画出一条水平主干线,箭头指向一个矩形框,框内注明研究的问题,即结果;根据影响河网区水污染排放的各种因素,分析确定影响较大的方面原因;将每种大原因进一步分解为中原因、小原因,直至分解的原因可以采取具体措施加以解决为止;检查图中的所列要素和原因是否齐全,对初步分析结果广泛征求意见,进行必要的补充和修改;选择影响权重大的关键因素,以便重点采取措施加以控制。用因果分析图来归纳影响河网区水污染排放要素和问题的因果关系。因果分析识别河网区水污染控制主要影响因素过程,见图1。

2.2 影响因素诊断分析方法

河网区水污染控制的关键影响因素,是对区域水资源特征、开发利用、节约保护和污染排放等诸方面综合分析的基础上,经过多要素分析而得出的,故需要对河网区水污染控制指标体系中的影响因素作全面定量分析,计算因素的综合影响贡献程度,确定能综合反映水资源、社会、经济、环境相互依存、相互协调关系的指标,使整体结构更为简单。系统控制关键影响因素指标定量诊断分析方法,主要有主成分分析法^[2]等。

2.2.1 主成分分析法基本原理

主成分分析是一种模式识别中的降维映射方法,主要是将多维空间的信息在低维(二维或三维)空间表现出来,消除众多信息相互重叠的部分。将原始变量进行转换,通过原始变量指标的线性组合,优化组合系数,使新的变量指标之间相互独立且代表性好。

如在一个指标体系中,有 n 个样本 m 个变量,形成指标矩阵 $X = [x_{ij}] (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$ 。

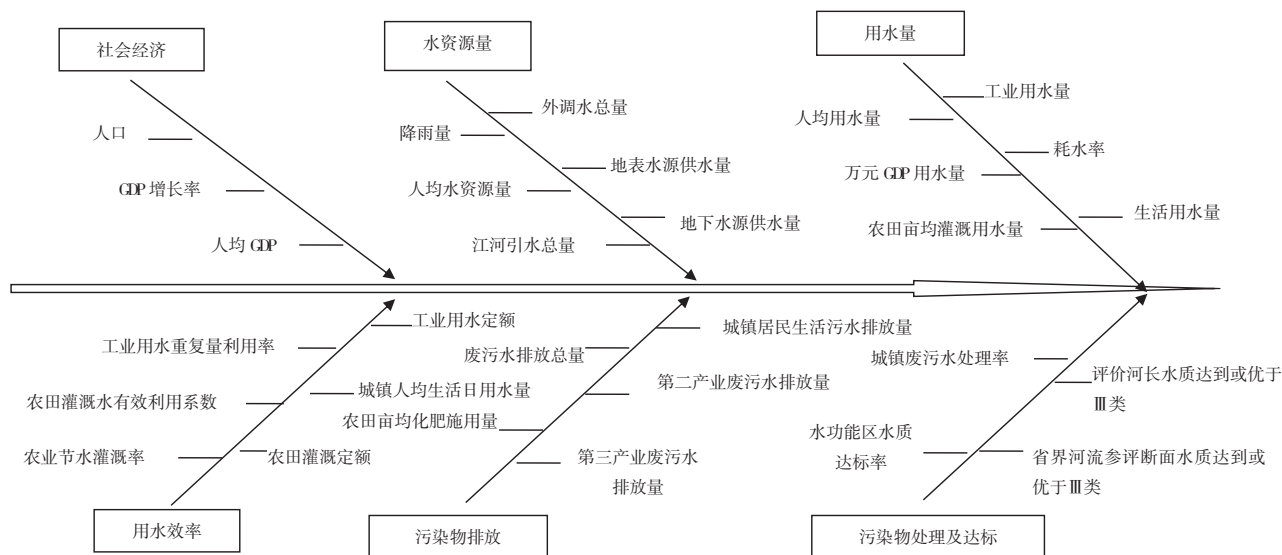


图1 因果分析法识别河网区水污染控制影响因素过程

它们的综合指标为 z_1, z_2, \dots, z_p ($p \leq m$), 则:

$$\begin{cases} z_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1m}x_m \\ z_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2m}x_m \\ \dots \\ z_p = l_{p1}x_1 + l_{p2}x_2 + \dots + l_{pm}x_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: z_i 和 z_j 互不相关, z_1 为 x_1 的一切线性组合的方差最大者, 并且彼此互不相关。这些新变量 z_1, z_2, \dots, z_p 就是原来变量的第一、第二、…、第 p 主成分。其中 z_i 在总方差中占的比例最大, 依次递减。

2.2.2 主要分析步骤

选取指标及指标的同趋化处理。通过以上指标选取, 对与评价目的呈负相关的指标进行同趋化处理。用 $1/x$ 或 $1-x$ 代替原指标, 保证所有指标得分都对评价目标作正贡献。

(1) 采集数据样本。设样本数据为 n , 对每个样本收集到的指标数据进行趋同化处理后得到矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 代表第 i 个样本第 j 项评价指标数值。

(2) 指标标准化处理。由于各指标数据量纲都不一致, 数量间的差异很大, 需要将不同度量的指标转化为同度量的指标。使各指标具有可比

性。标准化公式如下:

$$X_{ij} = \frac{Y_{ij} - EY_j}{\sqrt{DY_j}} \quad (3)$$

$$\text{式中: } EY_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ij}, DY_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - EY_j)^2,$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

(3) 计算相关矩阵。将处理后的指标进行相关性分析, 设 r_{ij} 为原来变量 x_i 与 x_j 的相关系数, 其计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

可得相关系数矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

整理得到: $R = XX^T/(n-1)$, 为实对称矩阵(即 $r_{ij} = r_{ji}$)。

(4) 计算特征值和特征向量。利用上述相关系数矩阵 R , 求特征方程 $|\lambda I - R| = 0$ 的 m 个特征值 λ_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 按其大小顺序排列, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$, 然后分别求出特征向量 e_i ($i = 1, 2, \dots, m$)。

(5) 计算主成分贡献率及累计贡献率。主成

分贡献率见式(6),累计贡献率见式(7)。

$$H_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$TH_k = \sum_{i=1}^p \lambda_k / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (7)$$

(6) 选择主成分并计算主成分载荷。设定对主成分所包含的总体信息程度,即累计贡献率。一般若前 p 个主成分提供了 85% ~ 95% 的信息量,则取特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 。所对应的第一、第二、...、第 p ($p \leq m$) 个主成分,变量数由 m 减至 p 个,产生了降维的效果。

主成分载荷计算式为:

$$M(zk, xi) = \sqrt{\lambda_k} ei(i, k = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

可进一步计算主成分得分:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可对影响因素归类,按照主成分代表的类别进行系统诊断分析。

3 实例分析

太湖流域为我国大型感潮河网区,涉及江苏省、浙江省和上海市,总面积 36895 km²,是我国经济社会发展最具活力的地区之一。2015 年人口 5997 万人,占全国总人口的 4.4%,GDP 为 6.69 万亿元,占全国总 GDP 的 9.9%,人均 GDP11.2 万元,是全国人均 GDP 的 2.3 倍。

2015 年太湖流域全年水质达到或优于Ⅲ类的比例仅为 20.3%,主要为氨氮、总磷、高锰酸盐指数、生化需氧量、化学需氧量和溶解氧等超标^[3]。

3.1 影响因素分析数据

针对太湖流域河网区社会经济和水污染情况,利用因果分析图法,河网区 26 个水污染控制的影响因素分析数据,见表 1^[3]。

表 1 太湖流域河网区水污染控制影响因素和分析数据

影响因素	单位	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
x ₁ 万元 GDP 用水量	m ³ /万元	204	189	167	148	130	107	96	83	73	64	62	54	51
x ₂ 农田灌溉水有效利用系数	%	0.48	0.49	0.5	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60
x ₃ 工业用水量重复利用率	%	55	57	59	61	63	64	65	66	67	68	69	70	72
x ₄ 农田亩均灌溉用水量	m ³ /亩	490	479	501	463	462	423	432	445	445	436	514	524	441
x ₅ 人均水资源量	m ³ /人	271	304	295	308	351	398	481	366	332	394	269	382	570
x ₆ 人均用水量	m ³ /人	753	834	782	762	758	708	685	620	604	590	610	574	567
x ₇ GDP 增长率	%	22.19	21.35	16.17	15.30	17.10	15.57	11.22	16.51	12.76	12.00	7.00	8.80	7.80
x ₈ 人均 GDP	万元/人	3.7	4.4	4.7	5.2	5.8	6.6	7.1	7.5	8.2	9.2	9.7	10.4	11.2
x ₉ 人口数量	万人	4069	4131	4533	4741	4917	5007	5159	5724	5879	5920	5971	5993	5997
x ₁₀ 降雨量	mm	967	1050	1043	1085	1151	1214	1347	1222	1119	1355	1091	1288	1624
x ₁₁ 地表水源供水量	亿 m ³	302.9	341.6	352.1	359.3	371.2	353.1	352.1	354.7	354.3	349.1	363.7	338.2	336.3
x ₁₂ 地下水源供水量	亿 m ³	3.3	2.7	2.2	1.8	1.5	1.5	1.1	0.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3
x ₁₃ 长江引水总量	亿 m ³	79.4	90.9	81.3	138.9	98.2	148.9	147.4	154.5	178.2	187.5	197.2	184.1	60.0
x ₁₄ 钱塘江引水总量	亿 m ³	5.1	5.4	5.3	2.4	3.7	3.8	3.8	4.3	4.0	4.1	4.1	5.1	10.4
x ₁₅ 城镇居民生活污水排放量	亿 t	13.7	15.0	16.0	16.1	16.5	16.6	17.0	16.9	17.3	18.2	19.0	19.1	19.5
x ₁₆ 第二产业废污水排放量	亿 t	33.1	33.0	36.0	36.3	35.7	34.9	32.8	33.4	32.8	32.1	31.6	29.7	28.9
x ₁₇ 第三产业废污水排放量	亿 t	6.6	8.4	9.4	9.7	10.8	11.8	12.6	12.9	13.6	14.0	14.1	15.3	15.6
x ₁₈ 耗水率	%	35	35	31	31	30	30	29	31	28	28	28	27	26
x ₁₉ 评价河长水质达到或优于Ⅲ类比例	%	9.4	6.5	10.3	13.5	14.3	14.8	11.8	12.5	16.6	18.7	19.9	24.3	20.3

(续表 1)

影响因素		单位	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
x ₂₀	省界河流参评断面水质达到或优于Ⅲ类比例	%	25.0	16.7	27.3	27.3	25.0	28.6	28.6	31.4	25.7	25.0	15.6	29.4	32.4
x ₂₁	水功能区全年期水质达标率	千 hm ²	14.9	15.6	18.6	23.3	10.8	8.6	6.9	5.1	14.2	35.5	26.7	29.7	27.9
x ₂₂	废污水排放总量	亿 t	53.4	56.4	60.4	62.1	63	63.3	62.4	63.2	63.7	64.3	64.7	64.1	64.0
x ₂₃	农业节水灌溉率	%	35.8	37.1	37.8	38.9	40.2	41.8	42.5	43.5	44.0	44.6	45.2	45.9	46.2
x ₂₄	城镇废污水处理率	%	71.0	76.0	76.8	81.7	83.5	84.1	85.4	87.6	88.7	89.2	89.6	90.1	90.6
x ₂₅	城镇废污水处理回用率	%	32.1	33.0	28.9	32.0	29.2	35.6	28.6	29.3	30.2	30.9	31.2	32.2	33.5
x ₂₆	农田亩均化肥施用量	kg/ 亩	46.5	47.2	48.0	48.2	48.1	48.7	48.5	48.7	48.5	48.9	49.1	49.5	49.2

3.2 主成分贡献率和载荷

利用主成分分析方法, 计算太湖流域河网区水污染控制影响因素特征值及主成分贡献率, 见表 2。

由表 2 可知, 太湖流域河网区水污染控制影响因素第一、第二、第三主成分的累计贡献率已达到 85.56%, 达到主成分分析规定要求。根据主成分载荷计算公式得到主成分载荷矩阵, 见表 3。

表 2 特征值及主成分贡献率

主成分	特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
一	17.12	65.85	65.85
二	3.27	12.57	78.43
三	1.85	7.13	85.56
四	1.19	4.57	90.13
五	0.81	3.13	93.26
六	0.65	2.50	95.76
七	0.54	2.09	97.85
八	0.29	1.12	98.97
九	0.13	0.50	99.47
十	0.11	0.42	99.89
十一	0.03	0.11	100.00

表 3 主成分载荷矩阵

影响因素	第一主成分	第二主成分	第三主成分	影响因素	第一主成分	第二主成分	第三主成分
x ₁	-0.932	0.038	-0.052	x ₁₄	0.925	0.453	-0.278
x ₂	0.155	0.884	0.050	x ₁₅	0.968	0.135	-0.133
x ₃	-0.002	0.907	-0.005	x ₁₆	-0.992	-0.548	-0.494
x ₄	-0.929	0.507	-0.210	x ₁₇	0.912	0.001	0.057
x ₅	0.467	0.523	-0.604	x ₁₈	0.082	0.123	0.743
x ₆	-0.904	-0.157	-0.236	x ₁₉	0.287	0.879	-0.056
x ₇	-0.133	-0.910	0.162	x ₂₀	0.170	-0.852	0.443
x ₈	0.213	0.933	0.073	x ₂₁	0.375	0.824	-0.206
x ₉	0.061	0.942	0.008	x ₂₂	0.981	-0.285	-0.278
x ₁₀	-0.375	0.415	0.734	x ₂₃	0.077	0.788	0.031
x ₁₁	-0.983	0.472	-0.480	x ₂₄	0.905	-0.111	-0.063

(续表 3)

影响因素	第一主成分	第二主成分	第三主成分	影响因素	第一主成分	第二主成分	第三主成分
x_{12}	0.914	0.044	0.063	x_{25}	-0.135	0.822	0.102
x_{13}	0.935	0.094	0.001	x_{26}	0.954	-0.080	-0.091

3.3 影响因素诊断分析

根据表 2 的污染控制影响因素主成分贡献率, 结合表 3 的主成分载荷值, 可以看出:

(1) 第一主成分: 对污染控制影响的贡献率为 65.85%, 其中万元 GDP 用水量(X_1)、农田亩均灌溉用水量(X_4)、人均用水量(X_6)、地表水源供水量(X_{11})、地下水源供水量(X_{12})、长江引水总量(X_{13})、钱塘江引水总量(X_{14})、城镇居民生活污水排放量(X_{15})、第二产业废污水排放量(X_{16})、第三产业废污水排放量(X_{17})、废污水排放总量(X_{22})、城镇废污水处理率(X_{25})、农田亩均化肥施用量(X_{26})等 13 个影响因素的载荷系数在 0.9 以上, 与第一主成分都有较强的正相关或负相关, 表明这些因素对太湖流域河网区水污染控制具有很强的影响力。

(2) 第二主成分: 对污染控制影响的贡献率为 12.57%, 其中农田灌溉水有效利用系数(X_2)、工业用水重复利用率(X_3)、GDP 增长率(X_7)、人均 GDP(X_8)、人口(X_9)、评价河长水质达到或优于Ⅲ类(X_{19})、省界河流参评断面水质达到或优于Ⅲ类(X_{20})、区水全年期水质达标率(X_{21})、农业节水灌溉率(X_{23})、城镇废污水处理回用率(X_{25})等 10 个影响因素的载荷系数为 0.8 ~ 0.9, 与第二主成分都有较强的正相关或负相关, 表明这些因素对太湖流域河网区水污染控制具有一定的影响力。

(3) 第三主成分: 指标影响贡献率仅为 7.13% 左右, 其中人均水资源量(X_5)、降雨量(X_{10})和耗水率(X_2)等 3 个因素的的载荷系数为 0.7 ~ 0.8, 表明这些因素对太湖流域河网区水污染控制影响效力相对较小。

上述分析结果表明, 供用水量、废污水排放量等水资源开发利用和经济社会发展等因素, 是太湖流域河网区水污染控制的关键影响因素。

4 结语

河网地区是我国水资源比较丰富的地区, 遍布的河网为社会经济的快速发展提供了宝贵资源。河网区人口密集、经济发达, 大量工农业废污水和生活污水直接或间接排放到河网中, 对水体水质和水生态环境构成严重威胁^[4]。河网区水污染控制的主要措施为:

(1) 地表水污染控制。加强河网地区工业污染控制, 做到增产减污或增产不增污; 加大城市污水处理设施建设力度, 提高污水处理水平; 加强面源污染控制, 减少氮、磷排放量; 实施排污口整治工程, 优化入河排污口设置; 加强监测预警, 提高应急处置能力。

(2) 地下水污染控制。调整河网地区供水格局, 将优质有限的深层地下水主要用于城乡居民的生活供水; 划定地下水保护区, 设置卫生防护带; 完善地下水资源管理制度, 加强对地下水取水的监督、检查; 完善地下水监测网络、动态管理信息和预警系统。

(3) 水生态保护和修复。合理配置河网地区水资源, 优化水利工程调度, 建设生态用水保护工程, 保障河流生态基流量和湖库生态水位; 建设河湖湿地生态工程, 培育水生植被, 恢复湖泊、河流水生态系统功能; 健全生态监测与预警网络体系, 维护河湖水生态系统良性循环。

参考文献:

[1] YU Miao, JIN Tong. Principal Component Analysis of Major Pollutants Discharge Amount in Major Cities, Agricultural Science&Technology[J]. 2017, 18 (7):1260-1262 .

[2] 李玉珍, 王宜怀. 主成分分析及算法[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2005 (01):32-36 .

[3] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域及东南诸河水资源公报[R]. 2003-2016 .

[4] 郑石, 王荧. 基于主成分分析的农业经济与环境污染问题研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29 (6):125-130 .