

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.008

昆明市水代谢系统中的水质代谢状况评估

吴波^{1,2}, 赵越^{1,2}, 陈岩^{1,2}, 曾维华³, 赵琰鑫^{1,2}, 白辉^{1,2}, 秦顺兴^{1,2}, 李中华^{1,2}

(1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 2. 长江经济带生态环境联合研究中心, 北京 100012;
3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:为分析昆明市水代谢系统内水质代谢状况,采用基于灰水足迹的城市水质代谢生态网络分析方法,通过量化参与水质代谢的各过程及构建参与水质代谢过程中各组分之间的网络关系模型,评估了影响昆明市水质代谢的主要因素与2017年的水质代谢效果。结果表明:在目前治理措施下,城市生活污染源仍是影响其水质代谢的主要因素,污染贡献占比达到35.33%,其次是城市降雨径流非点源污染(占23.12%);昆明市水质代谢过程是紊乱的。

关键词:水代谢系统;水质代谢;生态网络分析;灰水足迹;昆明市

中图分类号:TV213.4;X824 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)03-0040-06

Assessment of water quality metabolism in water metabolism system of Kunming City // WU Bo^{1,2}, ZHAO Yue^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, ZENG Weihua³, ZHAO Yanxin^{1,2}, BAI Hui^{1,2}, QIN Shunxing^{1,2}, LI Zhonghua^{1,2} (1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. United Center for Eco-Environment in Yangtze River Economic Belt, Beijing 100012, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to analyze the water quality metabolism in the water metabolism system of Kunming, the major factors affecting water metabolism in Kunming and the 2017 water metabolism effect were assessed by adopting the urban water quality metabolism ecological network analysis method based on grey water footprint and by quantifying each process of water metabolism and constructing the network relation model of each component in the process of water metabolism. The results showed that under the current control measures, the pollution source of life in the city was still the main factor affecting the water metabolism, and the contribution of pollution was 35.33%, followed by the non-point source of urban rainfall runoff (23.12%). The overall water metabolism in Kunming is disordered.

Key words: water metabolism system; water quality metabolism; ecological network analysis; grey water footprint; Kunming City

昆明市是长江经济带的重要支点城市和长江上游生态保护屏障,随着城市化进程的推进,地区的水环境问题变得十分突出。“十二五”和“十三五”期间,虽然采取了许多有效的措施来治理污染,但昆明市内滇池等主要河流湖库的水质仍然大范围超标。为了实现水生态环境的根本改善,需要评估采取治理措施后,昆明市水代谢系统的水质代谢过程是否能够“健康运转”,是否有利于水质恢复。

对于城市水代谢系统(urban water metabolism system),前人多将其内部各个组分以流的分析形式

进行研究^[1-2],并表征出边界输入输出量和内部的结构关系^[3-5],其中生态网络分析(ecological network analysis)法由于可以定量分析组分间生态流的方向和作用效果^[6-8],使用较广泛。目前对城市水代谢系统的研究大多考虑了水量代谢,对水质代谢的研究较少^[9]。为此,本文采用灰水足迹方法量化城市水代谢系统中各种水质代谢过程,在此基础上,采用生态网络分析法建立城市水代谢系统中的水质代谢过程生态网络模型,评估昆明市2017年在供水、用水、废水排放和水处理回用等过程中的水质变化情况,确定水代谢系统内参与水质代谢过程的各组分相互

基金项目:国家重大水体科技专项(2012ZX07102)

作者简介:吴波(1983—),女,副研究员,博士,主要从事水环境模拟研究。E-mail: wu_bo@caep.org.cn

通信作者:陈岩,副研究员。E-mail: chenyan@caep.org.cn

作用关系和水质代谢过程的健康状况,为昆明市水污染治理等规划方案的制定提供参考。

1 研究区概况

昆明市位于云贵高原中部,面积 2.101 万 km²,2017 年末常住人口为 678.3 万人,有滇池和阳宗海两个主要湖泊。滇池流域面积 2920 km²,具有城市供水、农业灌溉、旅游、水产养殖和工业用水等功能,水质较差,总体水质为 V 类,处于中度富营养化状态,COD、TN、TP、NH₃-N 和高锰酸盐指数均超标,在流入滇池的 35 条河流中,约 80.6% 的河流水质超过地表水 III 类标准。阳宗海流域面积 252.7 km²,总蓄水量 6.04 亿 m³,水质较好,近 5 年水质均为 III 类。2017 年,全市工业污染源、农业污染源和城市生活污水的 COD 排放量分别为 3961.97 t、64.27 t 和 7754.26 t,NH₃-N 排放量分别为 288.87 t、1.12 t 和 2214.67 t;大气沉降 TN 为 654 t,内源污染 TN 为 825 t;昆明市内 23 座污水处理厂总的处理量为 5.42 亿 t,污水处理厂进出口的最大 COD 质量浓度

分别为 295.82 mg/L 和 17.20 mg/L^[10-12]。工业废水全部经过自处理后排入到集中污水处理厂,但是仍有来自农业的畜禽养殖废水和居民的日常生活污水直排入河。此外,农业非点源污染(TN 排放量为 3317 t)和城市降雨径流非点源污染(TN 排放量为 679 t)对昆明市的水体也产生很大影响。

2 研究方法

2.1 水质代谢过程的量化

在城市水代谢系统中包含有各种水质代谢过程(表 1),本文采用灰水足迹方法对这些过程进行量化。灰水足迹是一个量化水污染程度的指标,定义为在自然背景浓度或现有的环境水质标准下,稀释污染负荷需要的水资源量,它并不是实际的水资源消耗量,而是以稀释污染物需要的水量来表达水污染等级,值越高代表污染程度越严重。基于 Hoekstra 等提出的灰水足迹基础公式^[13-15],根据各水质代谢过程的特征,提出以下对应于水质代谢过程的量化公式。

表 1 城市水代谢系统中的水质代谢过程

Table 1 Water quality metabolism process in urban water metabolism systems

过程代号	水质代谢过程	在网络模型中相关的路径
G1	大气干湿沉降污染	属于 z_1 的一部分(为正值)
G2	地表径流非点源污染	等同于 z_7 (为正值)
G3	自然降解或通过相关技术治理减少的水体内源污染	属于 z_1 的一部分(提高水质的过程为负值)
G4	河流或湖泊的内源污染	属于 z_1 的一部分(为正值)
G5	农业生产污染	属于 z_3 的一部分(为正值)
G6	工业用水污染	属于 z_2 的一部分(为正值)
G7	服务业用水污染	属于 z_4 的一部分(为正值)
G8	城市生活用水污染	属于 z_5 的一部分(为正值)
G9	农村生活用水污染	属于 z_6 的一部分(为正值)
G10	进入自然环境的农业非点源污染	等同于 f_{13} (为正值)
G11	直排入自然环境的工业废水污染	等同于 f_{12} (为正值)
G12	直排入自然环境的服务业废水污染	等同于 f_{14} (为正值)
G13	直排入自然环境的城市生活污水污染	等同于 f_{15} (为正值)
G14	直排入自然环境的农村生活污水污染	等同于 f_{16} (为正值)
G15	经集中污水处理厂处理后排入自然环境的污染	等同于 f_{18} (为正值)
G16	地表降雨径流进入自然水体带来的污染	等同于 f_{17} (为正值)
G17	经自身污水处理设施处理后减少的工业废水污染	属于 z_2 的一部分(提高水质的过程为负值)
G18a	经分散污水处理设施处理后减少的服务业废水污染	属于 z_4 的一部分(提高水质的过程为负值)
G18b	经分散污水处理设施处理后减少的城市生活污水污染	属于 z_5 的一部分(提高水质的过程为负值)
G18c	经分散污水处理设施处理后减少的农村生活污水污染	属于 z_6 的一部分(提高水质的过程为负值)
G19a	经集中污水处理厂处理后减少的工业废水污染	等同于 f_{82} (为正值)
G19b	经集中污水处理厂处理后减少的降雨径流污染	等同于 f_{87} (为正值)
G19c	经集中污水处理厂处理后减少的农业生产废水污染	等同于 f_{83} (为正值)
G19d	经集中污水处理厂处理后减少的服务业废水污染	等同于 f_{84} (为正值)
G19e	经集中污水处理厂处理后减少的城市生活污水污染	等同于 f_{85} (为正值)
G19f	经集中污水处理厂处理后减少的农村生活污水污染	等同于 f_{86} (为正值)
G19g	经集中污水处理厂处理后减少的公共服务业废水污染	忽略
G20	进入土壤和植物中的污染	属于 z_3 的一部分(间接提高水质的过程为负值)
G21	公共服务业用水污染	忽略
G22	排入自然环境的公共服务业废水污染	忽略

注: z 和 f 分别代表图 1 生态网络模型中外界对各个节点和各节点之间的作用流;公共服务业指洗车、道路喷洒等行业。

a. 一般过程的灰水足迹计算公式为

$$W_1 = \frac{L}{1000(\rho_{\max} - \rho_n)} \quad (1)$$

式中: W_1 为一般过程的灰水足迹, m^3/a ; L 为污染负荷, kg/a ; ρ_{\max} 为选用的水质标准中规定的最大可接受质量浓度, mg/L ; ρ_n 为受纳水体的自然背景质量浓度, mg/L 。式(1)适用于计算表 1 中的过程 G1、G3、G4、G6、G7、G8、G9、G17、G18、G21。例如: 计算过程 G6 时, L 为工业生产中产生的总污染量; 当计算过程 G17 时, L 为工业自身污水处理设施处理后减少的总污染量。根据 Hoekstra 等^[13]的建议, ρ_n 可视为 0; ρ_{\max} 以 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中 III 类水体的水环境质量标准作为衡量基准。因为低于 III 类的水体视为低水质的水体, 研究灰水足迹时都是基于排污量约束为前提的, 因此选择较高的水质标准来约束排污量。

b. 质量浓度变化过程的灰水足迹计算公式为

$$W_2 = \frac{V_e \rho_e - V_a \rho_a}{\rho_{\max} - \rho_n} \quad (2)$$

式中: W_2 为有质量浓度变化过程的灰水足迹, m^3/a ; V_e 为流出污水的体积, m^3/a ; V_a 为受纳水的体积, m^3/a ; ρ_e 为污水中污染物的质量浓度, mg/L ; ρ_a 为受纳水的实际质量浓度, mg/L 。式(1)中的污染负荷 L 可以用 V_e 与 ρ_e 乘积减去 V_a 与 ρ_a 乘积求得。式(2)适用于污染物质量浓度变化过程的计算, 一般计算污染物进入受纳水体后带给受纳水体的灰水足迹值, 可用于计算表 1 中的过程 G2、G11、G12、G13、G14、G15、G16、G19、G22。例如: 计算过程 G2 时, V_e 为总径流量, ρ_e 为地表径流中污染物的平均质量浓度 (V_e 和 ρ_e 取决于降雨时长、监测点的水体质量浓度、径流量和取样条件), ρ_a 由于雨水降落到地面而为 0; 计算过程 G11 时, V_e 为工业生产的废水直排入受纳水体的水量, ρ_e 为直排入受纳水体的工业废水中污染物的平均质量浓度, ρ_a 为受纳水体的背景质量浓度。式(1)和式(2)主要用于计算点源污染物的灰水足迹。

c. 非点源污染过程的灰水足迹计算公式为

$$W_3 = \frac{\alpha A}{1000(\rho_{\max} - \rho_n)} \quad (3)$$

式中: W_3 为非点源污染过程的灰水足迹, m^3/a ; α 为径流浸出百分比, 表示化学物质能够浸入到自然水体的质量分数, 可取 $\alpha = 1.85\%$ ^[16]; A 为进入土壤的污染物质量, kg/a 。式(3)适于计算过程 G5 和 G10。

以上各水质代谢过程在计算时需要注意:

a. 由于各产业和生活排放的主要污染物并不

相同, 需要计算多个污染物灰水足迹, 取最大的污染物灰水足迹值来反映污染物危害程度。

b. 计算产业和生活水质代谢过程的灰水足迹时, 废污水和污染物排放的数据不是整体获得的, 如工业污染物排放量是分别统计的, 其灰水足迹是每个工业企业灰水足迹计算后累加求得。

c. 计算表 1 中过程 G19a ~ G19g 时, ρ_e 是工业废水、污水、雨水和渗入水的最初质量浓度。由于污水处理设施中污水的质量浓度无法得知, 且污水在处理过程中的渗漏和污染物吸附所造成的质量浓度变化的影响比较小, 可忽略, 因而 ρ_a 值取 0。

d. 在计算受纳水体通过自然降解而减少污染物这一过程的灰水足迹时(过程 G3 的一部分), L 值取决于水体的水环境容量, 因为水环境容量是水体容纳污染物的量或自身净化并保持生态平衡的能力。

e. 计算过程 G16 时, V_e 可以通过过程 G2 与 G19b 的 V_e 相减得出, G19b 的 V_e 是进入污水处理厂的雨水量。

f. 计算过程 G20 时, 其灰水足迹值是过程 G5 的 30%, 因为进入植物和渗入土壤中的污染量是农业污染物总量的 30%^[17]。

g. 由于公共服务业污水量较小, 且环保部门没有相关统计, 故本文计算时忽略过程 G19g、G21 和 G22。

2.2 水质代谢网络模型的构建

采用生态网络分析法构建城市水代谢系统中水质代谢流(水质代谢过程)的概念性网络结构模型如图 1 所示。水质代谢流中共有 8 个组分(等同于网络模型中 8 个节点): 自然环境水系统(组分 1)、工业污染源(组分 2)、农业污染源(组分 3)、服务业污染源(组分 4)、城市生活污染源(组分 5)、农村生活污染源(组分 6)、城市降雨径流非点源(组分 7)和集中废水处理系统(组分 8)。以生态学中生产者、消费者和分解者 3 个类别来看, 组分 2、3、4、5、6、7 是产生污染物的组分, 处于生产者的角色; 组分 1 是受纳污染物的水体, 是消费者的角色; 组分 8 比较特别, 可以将其暂考虑为分解者的角色, 这个分解者主要承担一部分消费者的责任, 同时相对于消费者(组分 1)来讲, 其所排出水中的污染物质量浓度如果较高, 会对消费者产生影响, 所以又扮演生产者的角色。目前我国城市集中污水处理设施排水中的污染物浓度要求均低于 III 类水质标准, 因此, 在整个水质代谢过程中组分 8 普遍扮演着生产者的角色。网络模型中共定义了 20 个代谢路径反映水代谢系统中 8 个组分之间的水质代谢过程。

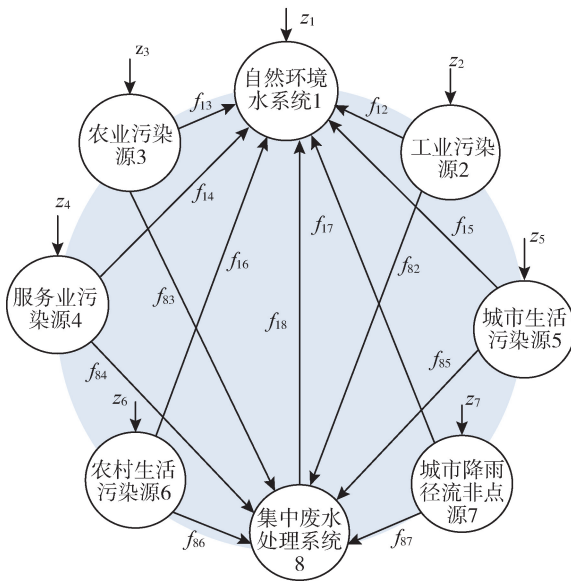


图1 城市水代谢系统中水质代谢网络结构模型

Fig. 1 Water quality metabolism network structure model in urban water metabolism system

2.3 网络通量分析和利用分析

研究城市水代谢系统中水质代谢过程的网络结构状况时,需要用生态网络分析法中的网络通量分析方法来量化网络结构,得出网络结构中每个节点对于整个网络的贡献;并用网络利用分析方法评估节点之间的关系,得出整个网络是否存在促进关系。

采用网络通量分析方法来量化网络结构中每个节点对于整个网络的贡献,主要步骤如下:列出表示网络状况的直接流矩阵 F (节点数为 8 的八阶矩阵),根据每个节点的输入、输出流情况计算每个节点的流总和;利用所有节点各自的流总和构成整个网络通量;以节点之间的相互作用流除以网络通量得到任意节点之间作用的无量纲流,并构成无量纲流矩阵;利用无量纲流矩阵和网络通量得到有量纲矩阵,从而计算出每个节点对其他节点的贡献以及该节点在网络中的占比。具体计算公式为

$$T_j = \sum_{i=1}^n f_{ij} + z_j = \sum_{i=1}^n f_{ji} + x_j \quad (4)$$

式中: T_j 为所有进入节点 j 的流总和; f_{ij} 、 f_{ji} 分别为从节点 j 、 i 到节点 i 、 j 的水质代谢过程,也是网络模型中两节点之间的作用流; z_j 为输入值; x_j 为输出值^[18]; n 为节点数。如果外界对节点没有输入,或者节点对外界无输出,则 z_j 和 x_j 的值为 0。

整个网络的通量 T 使用对角矩阵表示:

$$T = \text{diag}(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (5)$$

来自节点 j 到节点 i 的相互节点之间的无量纲流可以采用 g_{ij} 表示:

$$g_{ij} = f_{ij}/T_j \quad (6)$$

无量纲综合流矩阵 N 的计算公式为

$$N = (n_{ij}) = G^0 + G^1 + G^2 + G^3 + \dots + G^m = (I - G)^{-1} \quad (7)$$

其中 $G = (g_{ij})$ $G^0 = I$

式中 I 为单位矩阵。 G^0 意味着流从某一节点出又回到相同的节点中, G^1 意味着网络中的任何节点之间都是直接流, G^m ($m \geq 2$) 意味着节点之间存在 m 长度的间接流。本文网络结构无间接流, N 可直接由 $(I - G)^{-1}$ 计算得出。

有量纲综合流矩阵 Y 可以采用无量纲综合流矩阵 N 右乘对角化的通量矢量 T 求得。

通过以下公式计算矩阵的每个纵向量总数和:

$$y_j = \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (8)$$

式中: y_j 为节点 j 对其他节点的贡献; y_{ij} 为有量纲综合流矩阵 Y 的元素。

对于矩阵 Y 的占比可通过以下公式计算得到:

$$w = \sum_{i=1}^n y_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (9)$$

式中 w 为节点 j 对整个系统的贡献情况。

通过网络利用分析中的综合利用矩阵来反映网络中所有节点构造之间的关系^[19-20]:

$$D = (d_{ij}) \quad (10)$$

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D^m = (I - D)^{-1} \quad (11)$$

其中

$$d_{ij} = (f_{ij} - f_{ji})/T_j$$

式中: D 为直接利用矩阵; U 为无量纲综合利用矩阵; d_{ij} 为从节点 j 到节点 i 的节点流间的利用情况。矩阵 D^0 意味着通过每个节点的流是自反馈的,矩阵 D^1 意味着网络中任意两个节点之间是直接关系, D^m ($m \geq 2$) 意味着任意节点之间是间接关系。

无量纲综合利用矩阵 U 的一对配对迹象元素可以用来确定两个节点之间的关系。设定矩阵 U 的任何元素的利用关系表示为 s_{ij} , 则一对节点之间的直接关系可通过一个直接利用矩阵给出。如: $(s_{21}, s_{12}) = (+, -)$ 表示节点 2 利用节点 1; $(s_{21}, s_{12}) = (-, +)$ 表示节点 2 被节点 1 利用; $(s_{21}, s_{12}) = (0, 0)$ 表示两个相对的流是平等的; $(s_{21}, s_{12}) = (-, -)$ 表示节点 1 与节点 2 是竞争关系,两个节点之间存在消极影响; $(s_{21}, s_{12}) = (+, +)$ 表示节点 1 与节点 2 是共生关系,两个节点彼此之间都是获益的。因此,节点之间存在竞争、利用、中立和共生 4 类生态关系。

网络利用分析中采用共生指数 M 来定量表示系统的整个共生情况^[19,21]:

$$M = J(U) = S_+/S \quad (12)$$

$$S_+ = \sum_{ij} \max[\text{sgn}(u_{ij}), 0]$$

$$S_- = \sum_{ij} \left\{ -\min[\text{sgn}(u_{ij}), 0] \right\}$$

式中 $J(U)$ 为积极关系数量与消极关系数量的比率。如果 $M > 1$, 则矩阵内正号数目大于负号数目, 说明系统的节点之间存在更多积极的关系, 共生互利关系较多, 网络协作性较好。相反, 如果负号多于正号, 则系统存在更多消极的关系, 存在问题需要解决和处理。

3 结果和讨论

3.1 水质代谢量化结果

表 2 为用 4 种污染物计算得到的 2017 年昆明市灰水足迹, 每个过程以 4 个计算结果的最大值作为昆明市水代谢系统中各水质代谢过程的灰水足迹最终值。

表 2 昆明市水质代谢过程的灰水足迹

Table 2 Grey water footprint of water quality metabolism process in Kunming 10^8 m^3

过程代号	不同污染物指标计算的灰水足迹值				最终量化结果
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	
G1	14.04	6.58			14.04
G2			34.80		34.80
G3			1.60	0.01	1.60
G4			3.90	0.10	3.90
G5			5.49	1.55	5.49
G6	153.70	68.98			153.70
G7	5.22	3.21			5.22
G8	114.17	86.23	12.99	8.97	114.17
G9	12.41	8.90			12.41
G10			0.56	0.03	0.56
G12	0.59	0.12			0.59
G13	6.90	3.21			6.90
G14	3.67	1.30			3.67
G15	1.57				1.57
G16			31.09	18.12	31.09
G17	146.17	89.33	56.32		146.17
G18a	0.79	0.32	0.12	0.00	0.79
G18b	20.37	12.10	8.24	3.21	20.37
G19a	2.29	0.15	0.08	0.00	2.29
G19b	3.71	1.79	1.29	0.99	3.71
G19d	15.19	9.98			15.19
G19e	1.14	0.92			1.14
G19f			0.80		0.80
G20	1.65		0.93		1.65

利用图 1 中水质代谢网络结构模型中各节点之间的关系(两节点之间无关系则为 0), 构建 2017 年昆明市水代谢系统中参与水质代谢的各组分之间的直接流矩阵 F 。

3.2 水质代谢结构

根据直接流的情况, 按照公式(4)~(9)采用通

量分析方法计算了无量纲综合流矩阵 N 和有量纲综合流矩阵 Y , 以及各节点在整个水质代谢网络结构中的占比 w 。根据各节点 w 值画出图 2, 每个节点的占比代表着该组分对整个水质代谢过程带来的贡献或者影响。

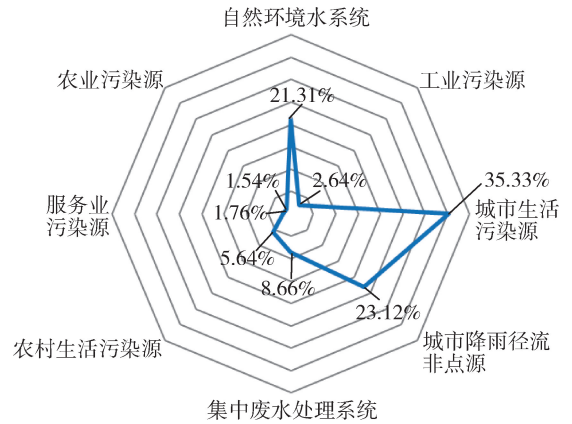


图 2 昆明市水代谢系统中参与水质代谢的各组分占比

Fig. 2 The proportion of each component involved in water quality metabolism in the water metabolism system of Kunming

从图 2 可以看出, 生产者组分中, 组分 5 城市生活污染源的灰水足迹占比最大(35.33%), 表明昆明市居民日常生活污染对水质变化(即水污染)产生了最大的影响, 是需要加大力度控制的污染源; 其次是组分 7 城市降雨径流非点源的灰水足迹, 占比 23.12%, 表明昆明市的管网配套设施和雨水收集系统不完善, 水土流失问题需要加大力度治理。

组分 8 集中废水处理系统的灰水足迹占比 8.66%, 表明昆明市虽然在 2017 年增设了 2 座污水处理厂, 但是工业、城镇生活的污染负荷比较大, 加上污水收集系统的能力不足(试运行的 8 个厂总处理规模不足总设计规模的 20%), 尚未实现截污和处理的有效联合调控。特别在降水量偏多的时期(汛期 23 座污水处理厂平均负荷率一度达到 103%), 雨污混流进入污水处理厂后无法处理直接外排, 对昆明市水体已造成一定的影响。组分 6 农村生活污染源的灰水足迹占比 5.64%, 表明农村居民生活地区的分散型污水处理设施和垃圾处理设施需要加紧建设。代表消费者的自然环境水系统(组分 1)的灰水足迹占比为 21.31%, 说明自然环境水系统自身存在的大气沉降和内源污染问题较严重, 同时接收来自其他组分的废水和污染物比较多, 致使自然环境水系统污染较严重。

3.3 水质代谢关系

基于图 1 中分析的各组分间水质代谢流的相互作用情况, 采用网络利用分析方法计算了 2017 年昆

明市水代谢系统中水质代谢的直接利用矩阵 D 和综合利用矩阵 U , 并绘制出 2017 年综合利用矩阵中任意节点之间的模式关系如图 3 所示。图 3 显示了该生态网络模型中存在利用、竞争和共生 3 类生态关系, 可用于分析水质代谢过程中各组分之间的代谢作用。

节点	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	-	+	+	+	+	+	-
2	+	+	+	-	-	-	-	-
3	-	+	+	-	-	-	-	+
4	-	-	-	+	-	-	-	-
5	-	-	-	-	+	-	-	-
6	-	-	-	-	-	+	-	-
7	-	-	-	-	-	-	+	-
8	-	+	-	+	+	+	+	+

图 3 水质代谢网络结构模型中各节点间的关系

Fig. 3 Relationship between nodes in the water quality metabolism network structure model

由图 3 可见, 各节点中存在的利用关系最多。 (s_{21}, s_{12}) 、 (s_{31}, s_{13}) 、 (s_{41}, s_{14}) 、 (s_{51}, s_{15}) 、 (s_{61}, s_{16}) 和 (s_{71}, s_{17}) 都与节点 1 相关, 其中 (s_{21}, s_{12}) 是 $(+, -)$ 的关系, 其他 5 个是 $(-, +)$ 的关系, 表明节点 1 利用节点 3、4、5、6、7, 即自然环境水系统承担着来自农业、服务业、城市生活、农村生活和城市降雨径流非点源的污染 (即灰水足迹值)。而节点 1 被节点 2 利用, 表明自然环境水系统并没有得到来自工业污染源的污染, 这是因为昆明市自 2009 年起注重解决工业废水直排的问题, 已严禁未经处理的工业废水直排入自然水环境中。 (s_{82}, s_{28}) 、 (s_{83}, s_{38}) 、 (s_{84}, s_{48}) 、 (s_{85}, s_{58}) 、 (s_{86}, s_{68}) 和 (s_{87}, s_{78}) 与节点 8 相关, 其中 (s_{83}, s_{38}) 是 $(-, +)$, 与其他 5 个 $(+, -)$ 的关系相反, 表明节点 8 利用节点 2、4、5、6、7, 即集中废水处理系统承担了来自工业、服务业、城市生活、农村生活和城市降雨径流非点源的污染。节点 8 被节点 3 利用, 说明集中废水处理系统并没有得到来自农业的污染。

节点 2、3、4、5、6、7 都是网络模型中的生产者排放源, 彼此之间属于竞争关系 $(-, -)$ 。另外, 比较特别的是 (s_{81}, s_{18}) 是 $(-, -)$, 说明节点 1 和节点 8 是竞争关系, 即自然环境水系统和集中污水处理系统都承受来自生产者的污染物, 因此二者存在竞争关系。

节点 2 和 3 为互利共生关系, 这是因为工业污染源和农业污染源都是这个网络中的生产者, 但是前者不直排污染物进入自然水体, 而是将污染物自处理后排入集中污水处理厂, 减少了对自然环境水系统直接排污这个环节; 后者产生的污染物没有通过集中污水处理系统进行处理, 而是进入自然环境

水系统, 等同于减少了从集中污水处理厂向自然环境水系统排污这一环节, 因此在减少排污上情况类似。此外, 相比于其他的污染源贡献组分, 工业污染源和农业污染源排放的污染物远少于其他排污较大的组分, 因此水质代谢关系分析中会出现互利共生关系。

共生指数 $M = 22/42 = 0.5238 < 1$, 表明在 2017 年昆明市水代谢系统的水质代谢过程中, 扮演生产者、消费者和分解者的 8 个组分之间协作性较差。虽然 2017 年昆明市在污染治理上采取了更多的措施, 但仍不能有效促使水质代谢过程转好, 水质代谢过程是紊乱的。

4 结论

a. 在 2017 年昆明市水代谢系统的水质代谢过程中, 城市生活污染源对昆明市水体造成的污染贡献最大, 贡献较大的有城市降雨径流非点源、农村生活污染源和集中废水处理系统的排水。因此, 昆明市仍要加大对生活污染的治理, 提高污水处理设施的处理规模, 加大管网设施的铺设和改建, 增加农村污水、垃圾收集和处理设施的建设, 注重水土流失治理。

b. 2017 年昆明市水代谢系统的水质代谢过程是紊乱的, 说明“十三五”时期的水污染控制和水环境治理措施的作用仍不显著, 污染治理措施建设规模和数量还需要进一步扩大, 同时需要加大水土保持措施的制定和实施。

参考文献:

[1] MARTELEIRA R, PINTO G, NIZA S. Regional water flows-assessing opportunities for sustainable management [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 82: 63-74.

[2] VERGER Y, PETIT C, BARLES S, et al. A N, P, C, and water flows metabolism study in a peri-urban territory in France: the case-study of the Saclay plateau [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 137: 200-213.

[3] KENNEDY C, PINCELT S, BUNJE P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design [J]. Environmental Pollution, 2011, 159 (8/9): 1965-1973.

[4] ZENG Weihua, WU Bo, CHAI Ying. Dynamic simulation of urban water metabolism under water environmental carrying capacity restrictions [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2015, 10 (1): 114-128.

(下转第 75 页)

- Plain[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(8):33-35. (in Chinese))
- [17] 卢士强,徐祖信.平原河网水动力模型及求解方法探讨[J].水资源保护,2003(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution[J]. Water Resource Protection, 2003(3):5-9. (in Chinese))
- [18] 向小华,吴晓玲,牛帅,等.基于显式有限体积法的一维河网模型[J].水利水电科技进展,2015,35(4):6-9. (XIANG Xiaohua, WU Xiaoling, NIU Shuai, et al. Construction of one-dimensional river network model based on explicit finite volume method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):6-9. (in Chinese))
- [19] 逢勇,王瑶瑶,胡绮玉.浙江温黄平原典型河流水质改善方案研究[J].水资源保护,2016,32(2):100-105. (PANG Yong, WANG Yaoyao, HU Qiyu. Research on water quality improvement scheme for a typical river in Wenhuan Plain in Zhejiang Province[J]. Water Resource Protection, 2016, 32(2):100-105. (in Chinese))
- [20] 杨松彬,董志勇.河网概化密度对平原河网水动力模型的影响研究[J].浙江工业大学学报,2007,35(5):567-570. (YANG Songbin, DONG Zhiyong. Study on the influence of river network generalized density to hydrodynamic model for plain river system[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(5):567-570. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-22 编辑:熊水斌)

(上接第45页)

- [5] DIDIER B S P, BENEDETTO R, SEBASTIEN L, et al. A review of urban metabolism studies to identify key methodological choices for future harmonization and implementation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163:5223-5230.
- [6] BODINI A, BONDAVALLI C. Towards a sustainable use of water resources: a whole-ecosystem approach using network analysis[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2002, 18(5):463-485.
- [7] ZHANG Y, YANG Z F, FATH B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: model development, and a case study for Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408:4702-4711.
- [8] ZHENG B Y, HUANG G H, LIU L R, et al. Metabolism of urban wastewater: ecological network analysis for Guangdong Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217:510-519.
- [9] WU Bo, ZENG Weihua, CHEN Honghan, et al. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:3138-3151.
- [10] 李海燕,黄延,吴根.昆明湖水质变化分析及污染控制对策[J].水资源保护,2007,23(5):18-20. (LI Haiyan, HUANG Yan, WU Gen. Water quality changes of Kunming Lake and pollution control methods[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(5):18-20. (in Chinese))
- [11] 昆明市水务局. 2017年昆明市水资源公报[R]. 昆明:昆明市水务局, 2017.
- [12] 昆明市环保局. 2017年昆明市环境质量公报[R]. 昆明:昆明市环保局, 2017.
- [13] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[D]. London: Water Footprint Network, 2011.
- [14] 尚海洋,宋妮妮.碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J].水资源保护,2018,34(2):15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):15-21. (in Chinese))
- [15] 任晓晶,白雪,刘丹,等.水足迹评价方法对比及案例研究[J].水利经济,2018,36(6):14-19. (REN Xiaojing, BAI Xue, LIU Dan, et al. Comparison and case study of assessment methods for water footprints [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6):14-19. (in Chinese))
- [16] JU X, XING G, CHEN X, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2009, 106:3041-3046.
- [17] PIZZOL M, SCOTTI M, THOMSEN M. Network analysis as a tool for assessing environmental sustainability: applying the ecosystem perspective to a Danish Water Management System[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 118:21-31.
- [18] FINN J T. Flow analysis of models of the Hubbard Brook Ecosystem[J]. Ecology, 1980, 61(3):562-571.
- [19] FATH B D. Community-level relations and network mutualism[J]. Ecological Modelling, 2007, 208:56-67.
- [20] SCHARLER U M, FATH B D. Comparing network analysis methodologies for consumer-resource relations at species and ecosystems scales [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(22):3210-3218.
- [21] OKUYAMA T, HOLLAND J N. Network structural properties mediate the stability of mutualistic communities [J]. Ecology Letters, 2008, 11:208-216.

(收稿日期:2019-01-27 编辑:熊水斌)