

水环境规划案例 1：滇池流域水污染防治中长期规划

一、规划的必要性

流域污染防治规划可为湖泊治理提供引导性和前瞻性的总体思路与方案，因而“规划先行”已成为我国流域水环境管理的基本准则之一。为此，自“九五”以来，国家针对重点湖（库）制定了一系列的流域水污染防治规划。

滇池是我国重点治理的“三湖”之一，是长江上游生态安全格局的重要组成部分。国家先后批准实施了滇池流域水污染防治“九五”计划及 2010 年远景规划、“十五”计划、“十一五”规划及补充报告、“十二五”规划、“十三五”规划。在规划的指导下，国家和地方政府实施了滇池治理的“六大工程”，共投资 500 多亿元用于水质改善，并取得了一定的效果。根据监测数据分析，2018 年、2019 年滇池全湖年均水质保持Ⅳ类，是三十余年来的最好水质。

尽管滇池水质恶化的趋势得到了一定的遏制，但从时间序列的趋势分析结果来看，水质尚未在根本上得到改善，且仍在一定范围内波动，水质受外部自然条件变化的不确定性仍然很大。一方面，巨额的治理投资尚未带来根本性的水质改善与生态恢复，而另一方面滇池治理的工程规模仍将不断增大，因此亟需更为科学的滇池治理规划来指导进一步的污染治理与富营养化控制。2020 年 1 月，习近平总书记考察滇池治理，更进一步强调“要拿出咬定青山不放松的劲头，按照山水林田湖草是一个生命共同体的理念，加强综合治理、系统治理、源头治理”。

就规划的时间尺度而言，之前的滇池规划基本上是短期规划，规划的编制基本上按照目标与指标设计、容量核算、负荷预测、规划方案设计等步骤，侧重于污染控制、生态修复和环境监管等方面的内容，尤其是短期实施的工程项目。而对于滇池的水质恢复，目前更为需要科学的中长期战略规划。与当前的流域水污染防治规划体系不同，中长期战略规划设计的基本思路有几个显著的特征：①强调流域尺度上的系统性，这与之前的规划主要以单个污染源为治理重点不同；②从流域经济社会发展与水环境保护的角度出发来分析水环境问题并提出方案；③以流域水环境承载力为基础，为区域经济社会发展与资源开发提供约束性指标；④已有的 5 年规划通常侧重于工程实施，缺乏长期性、系统性和前瞻性的规划思路以及规划评估与反馈，而流域尺度的中长期规划与短期规划的目的不同，重点在于为湖泊治理提供战略思路和引导。据此，滇池流域水污染防治中长期规划应重点关注几个问题：滇池水环境演变的系统评估及诱因识别；中长期规划目标的设定；与短期规划所不同的规划思路；流域尺度上以社会经济与水环境响应关系为基础的综合规划方案。

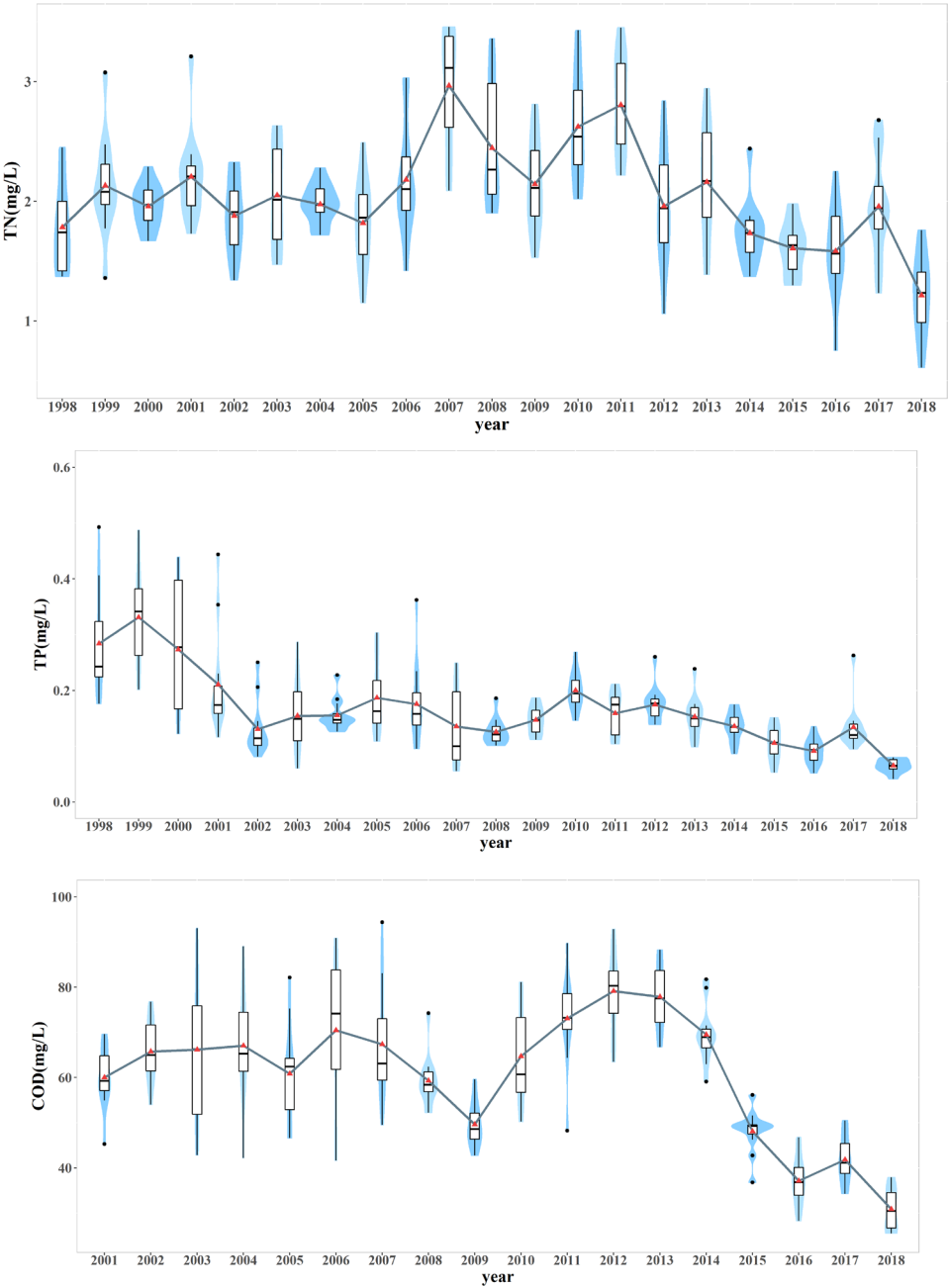
二、规划区域背景

滇池位于昆明主城区南部，分为外海和草海（其中外海为主体），处于长江、红河、珠江分水岭地带，属长江流域，为普渡河干流上的湖泊。滇池流域面积 2920km²，主要入湖河流有 35 条，集水面积大于 100 km² 的有 7 条，分别是盘龙江、宝象河、洛龙河、捞鱼河、晋宁大河、柴河、东大河。滇池正常高水位为 1887.5m，平均水深 5.3m，湖面面积 309.5 km²，湖岸线长 163km，湖容 15.6 亿 m³，多年平均入湖径流量为 9.7 亿 m³，湖面蒸发量 4.4 亿 m³。滇池流域的土地利用类型主要分为旱地、水田、园地、林地、建筑用地、水域及自然保留地，林地、城镇用地、旱地、湖泊水面及自然保留地，分别占流域面积的 35.77%、14.51%、10.60%、10.17%、7.65%。

根据《昆明市统计年鉴》（2019 年），滇池流域涉及昆明市五华、盘龙、官渡、西山、呈贡以及晋宁区，共计 52 个街道办和 2 个镇。2018 年，滇池流域常住总人口 404.8 万人，

占昆明市总人口的 92.4%，其中城镇人口 374.1 万人，农村人口 30.7 万人。2018 年，滇池流域涉及的五华、盘龙、官渡、西山、呈贡以及晋宁区实现地区生产总值（GDP）4030.98 亿元，占昆明市地区生产总值的 77%，三次产业结构比为 4.3:39.1:56.6。

从近年来滇池湖体水质变化看（图 1），主要指标化学需氧量、氨氮、总磷呈改善趋势。滇池外海化学需氧量呈波动变化，2018 年最优，达到 IV 类水标准；滇池草海化学需氧量逐年改善，2016 年以来，化学需氧量优于 IV 类水标准；滇池草海和外海氨氮均优于 IV 类水标准；滇池草海和外海总磷呈波动改善趋势，2018 年、2019 年优于 IV 类水标准。2019 年，滇池全湖水水质为 IV 类，营养状态为轻度富营养。其中，草海全年平均水质类别为 IV 类，主要指标中化学需氧量年均浓度为 13.13mg/L，总氮年均浓度为 2.53mg/L，总磷年均浓度为 0.08mg/L，氨氮年均浓度为 0.22 mg/L；外海全年平均水质类别为 IV 类，主要指标中化学需氧量年均浓度为 32.04mg/L，总氮年均浓度为 0.95mg/L，总磷年均浓度为 0.07mg/L，氨氮年均浓度为 0.13 mg/L。



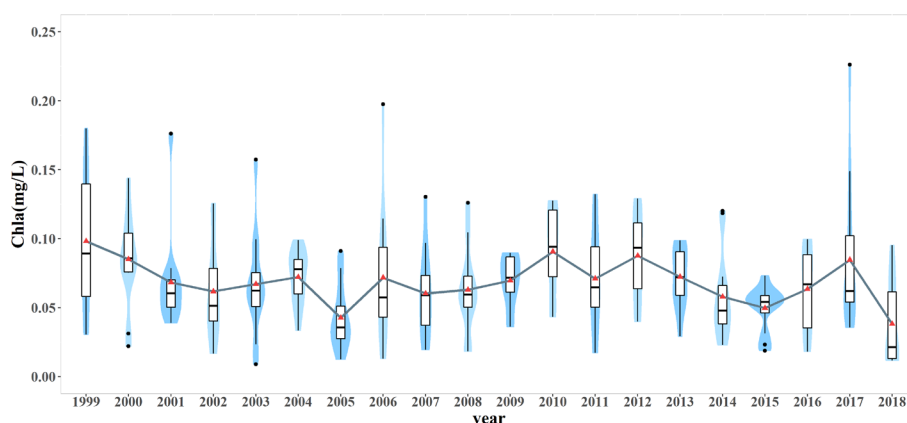


图 1 滇池外海的 TN、TP、COD 和 Chla 浓度波动变化

三、规划技术路线

滇池流域水污染防治中长期规划的目标在于：①综合评估：评估滇池水质变化态势及其流域水污染防治的实施效果；②系统集成：集成滇池相关研究的基础科学问题及结论；③战略规划：为流域水污染防治提供中长期战略规划方案；④决策支撑：为中长期流域水污染防治提供技术、工程和管理决策支持，为滇池富营养化控制提供可能的战略途径。据此提出中长期规划的框架：①战略目标：水质恢复的目标设定及实现程度与可能性，以及不同目标下的流域总量控制方案；②模式路径：不同社会经济发展情景和总量控制方案基础上的控源与减排方案；③适应调控：评估、调控以及在此基础上形成的水污染防治中长期决策方案。

根据技术框架的 3 个主要部分，确定了滇池流域水污染防治中长期规划研究的 6 个具体步骤：问题驱动→调查诊断→规划基础→规划方案→评估与调控→规划战略；并以流域水环境承载力方案及容量总量控制方案为基础展开（图 2）：①以流域水环境承载力为约束调整区域产业结构和社会经济发展模式，并考虑到社会经济发展的不确定性来设计水环境承载力情景，作为水质恢复方案的输入条件；基于水环境承载力的约束要求，确定流域社会经济发展的规模、方向和速度。②以水环境承载力情景方案为依托，叠加流域营养物质输移模型的输出结果，得到滇池流域不同时期、不同情景下的污染源排放及空间分布，并将污染负荷输入水质模型中得到水质响应；在此基础上，确定总量的空间分配与不同子流域的污染物削减方案。依据不同规划分区的总量控制方案与不同情景下的源输入与排放，制定以分区为尺度的空间分异性污染控制规划方案，并汇总得到流域总体方案。

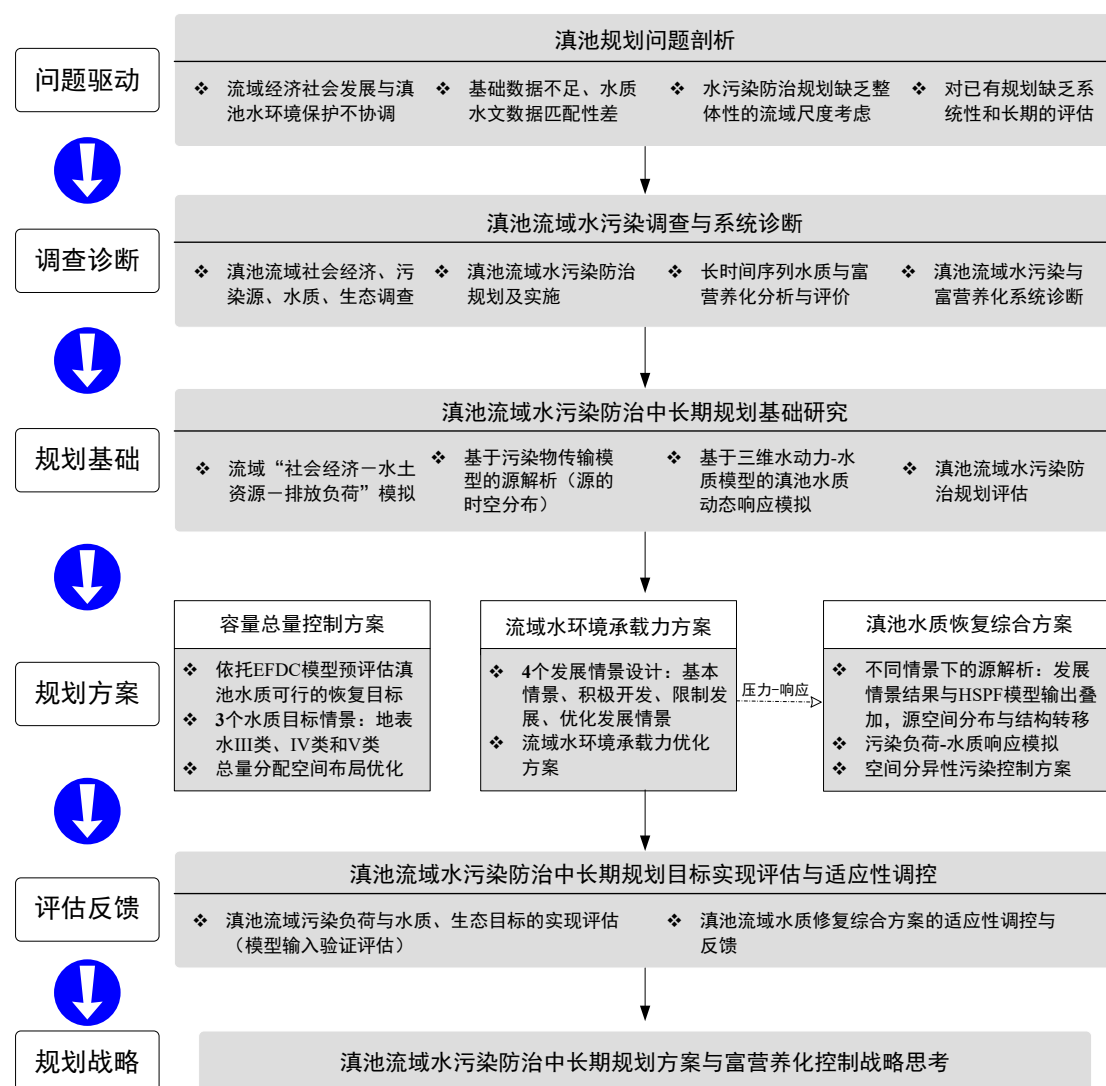


图 2 滇池流域水污染防治中长期规划技术路线

在本研究中，确定了 2 个规划时段：近期 2020 年、远期 2030 年（兼顾中期 2025）；根据滇池的 III 类水环境功能区划要求和劣 V 类的水质现状，设计 3 个递推的水质目标规划情景：V 类、IV 类和 III 类；基于流域水环境承载力方案确定了 4 个发展情景，即基本情景、积极开发、限制发展、优化发展。流域水环境承载力及 4 个发展情景的量化主要是基于开发的滇池流域“社会经济—水土资源—排放负荷”系统动力学模型及优化模型，流域营养物质转移和滇池水动力-水质模拟分别基于 HSPF 模型和 EFDC 平台，容量总量控制与子流域分配方案则是基于不确定性“模拟-优化”模型。子流域尺度上的空间分异性污染控制规划方案是本研究的重点，为此，在容量总量控制及水环境承载力和流域发展情景的模型结果基础上，提出源头控制、工程控制和末端控制相结合的控制对策（图 3）。

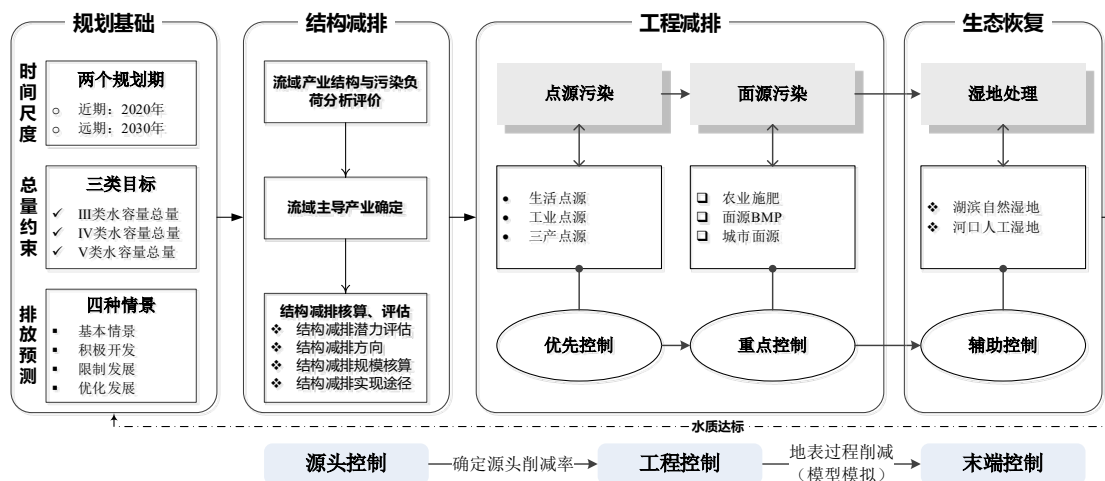


图 3 规划分区尺度水污染防治规划方案设计思路

四、规划思路与方案设计

4.1 问题识别与诊断

(1) 滇池水环境演变系统评估

滇池的水环境演变呈现出如下几个基本特征：①水质恶化整体趋势有所遏制，水质污染类型发生转变；②水生植被面积减小、种类单一；③湖滨带严重退化；④蓝藻水华周年性爆发。从单纯的水质评价来看，目前滇池外海在Ⅴ类~劣Ⅴ类之间波动；从单项指标分析，表征有机污染的指标（如： BOD_5 、 COD ）基本维持在Ⅲ类以下，而主要的超标因子是TN、TP，尤以TN最为突出（图1）。在时间尺度上，在过去的10~15年间，滇池外海的 BOD_5 逐年下降，而TN和TP波动上升，因此TN和TP应为未来的控制重点。已有研究发现，滇池的蓝藻水华爆发频率从2月份开始逐月上升、到8月份达到最高后又逐月降低，直到翌年2月，呈周年性趋势。

(2) 滇池水环境演变诱因识别

深入分析发现，造成滇池富营养化演变的诱因主要包括：①流域内缺乏清洁水循环；②“十一五”之前的滇池污染防治，对于流域社会经济和城市快速发展带来的负荷高速增长估计不足，治理速度赶不上污染排放速度；③流域入湖负荷长期远高于滇池水环境容量、减排压力很大。研究表明，若使滇池外海水质达到地表水Ⅴ类、Ⅳ类和Ⅲ类，需将入湖负荷分别削减54%、66%和80%；另据污染负荷模拟与核算，滇池北岸主城区的点源和面源负荷占据主导，滇池水质改善的流域控制重点仍在北岸。

进一步的滇池流域社会经济发展与水环境的影响分析发现，在不同的发展情景下，到2030年，流域常住人口规模在360万~530万之间，城镇化率维持在91.4%~95.9%的高水平。滇池治理最大的挑战是人口和经济发展带来的污染负荷压力的持续增大。为此，以水环境承载力为基础，提出了包括产业选择与提升、总人口规模控制、城镇人口优化分布、城镇化发展的集聚机制与政策环境在内的滇池流域产业和人口转移以及区域城镇化发展策略；但预计这一进程极具挑战并持久。一方面，滇池的治理要处理和削减由于城市人口的集中所带来的生活污染负荷；另一方面，却不得不面对更为迅速的城市化进程所带来的新的污染负荷的增加。因此，流域人口布局与产业结构调整、控源减排、湖泊生态恢复是滇池水质改善的关键途径。

4.2 规划分区

为突出滇池流域子流域的相似性与差异性，并制定重点和分异性控制对策，在滇池 110 个子流域划分的基础上，根据流域污染负荷模拟结果，以子流域为基本单元，综合考虑土地利用、河流水系、污染负荷、预期发展等特征，确定滇池流域水污染防治规划的 2 个一级分区和 8 个二级分区（图 4）。

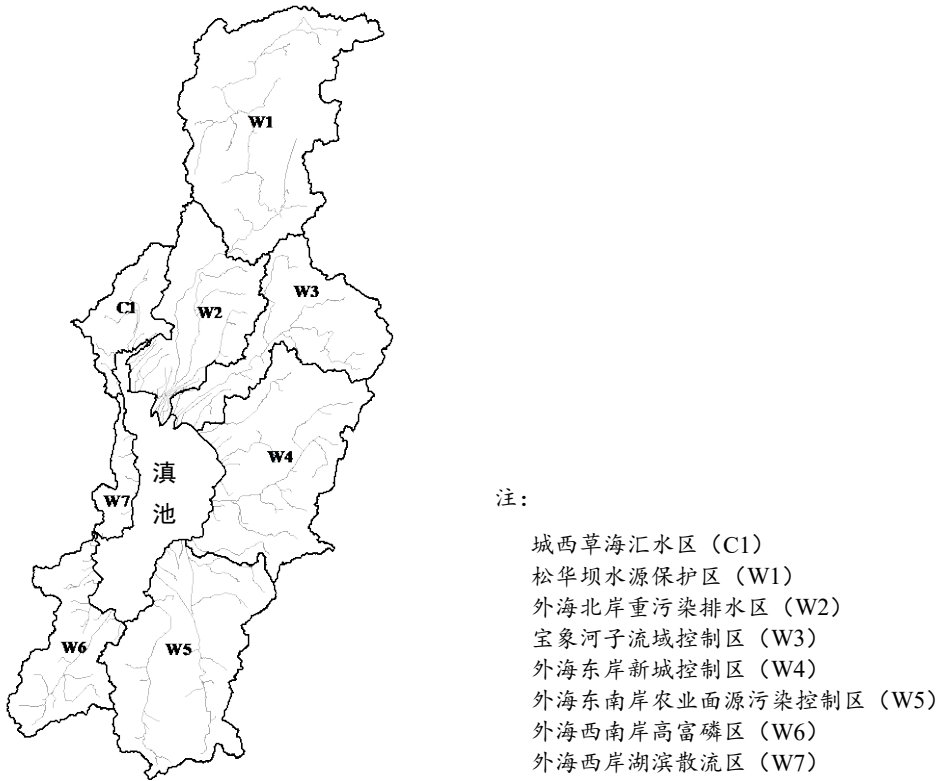


图 4 滇池流域污染控制分区

3.3 规划思路

根据上述分析，本文提出的滇池水污染防治规划的总体思路为：以实现滇池水质持续性改善为流域污染控制的中长期目标；以流域水环境承载力与容量总量控制为约束，通过构建 3 个尺度、8 个分区及 4 个规划重点的流域污染减排（抑增减负）集成体系及情景方案，为滇池水质恢复及生态修复提供外部条件（表 1）。其中，流域污染控制规划针对流域宏观尺度和 8 个分区，富营养化控制针对滇池湖体。

表 1 滇池流域水污染防治中长期规划总体思路

Table 1 Strategy and tasks for long-term planning

尺度	对象	规划出发点	规划思路	规划重点
流域宏观尺度	人口与产业	❖ 流域人口、产业与水环境的协调性 ❖ 未来人口与产业布局及空间调整方向 ❖ 未来人口与产业发展的污染排放 ❖ 人口与产业调整的结构减排潜力 ❖ 如何削减增量与存量	源头减排（抑增）	通过产业结构调整 and 人口布局调整，从结构上减少源头排放
	水资源	❖ 外流域补水工程实施后，如何结合雨水资源化和中水回用，实现在水质改善前提下的滇池及流域生态用水保障	优化调控	滇池水质改善的流域内外水资源调度分配；构建跨流域的自然水、外引水、中水 3 个层次的水循环系统
流域	流域	❖ 滇池北岸城区仍然是污染控制的核心	途径减排	对 C1、W2~W3 区的市政基础设施

分区	减排重点及潜力	- 滇池东岸是未来控制的重心, 目前规划的定位在于预防为主 - 滇池南岸是主要的农业产业调整区和农业面源污染控制区以及高富P区	(减负)	完善, 增大流域内外的中水回用量, 减少入湖负荷; W4区预防为先, 优先考虑低污染水的本区回用; W5~W7区要截留污染负荷, 减轻入湖负荷压力; W1区的核心为陆地生态修复和生态补偿机制的构建
滇池湖体	湖滨及湖体	- 外海分步、分区生态修复 - 外海蓝藻的抑制途径: 入湖负荷削减、水动力改变与湖滨带恢复 - 内负荷的清除与资源化途径	清水稳态(转型)	在湖体通过湖滨修复与水位调控、分区生态修复、水动力条件改变及内负荷清除与资源化, 创造条件推动外海稳态转换, 抑制蓝藻的爆发并持续改善水质

4 规划目标情景

规划目标与指标的确定在滇池流域水污染防治规划研究中起到非常重要的约束性和导向性作用。自“九五”规划以来, 我国的流域水污染防治规划的目标设定一直处于不停的反馈、评估与调整之中, 规划目标要确保切实可行性、动态调整性等基本原则也得到了迄今为止最为广泛的认可。滇池流域水污染防治中长期规划的目标与指标确定包括几个基本的步骤(图5): 问题诊断→目标评估→趋势预测→情景分析→指标与目标识别。规划的指标和目标分为4个层次: 水质和生态指标、水质目标、总量目标、管理目标, 其中水质和生态指标确定为COD、TN、TP和Chl *a*。如前述, 为了解不同水质恢复目标下的流域污染负荷削减情况, 并为滇池流域水污染防治与富营养化控制提供决策依据, 在此以III类、IV类和V类作为水质恢复的基本情景, 对应的Chl *a*结果由EFDC模拟得到。

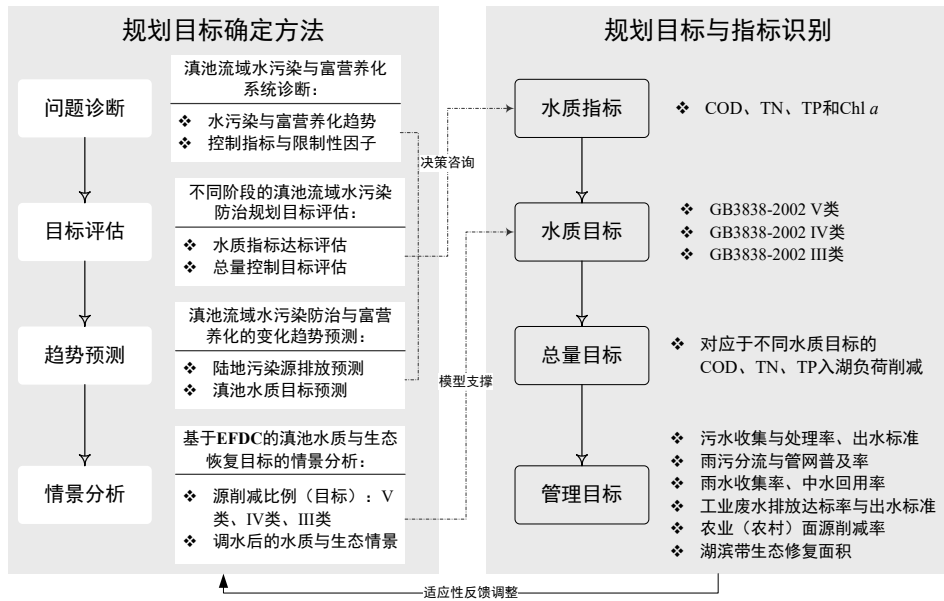


图5 滇池流域水污染防治中长期战略规划目标与指标确定的基本框架

4.5 流域空间布局型水污染控制规划方案

在规划目标、指标确定的基础上, 根据容量总量控制方案与流域水环境承载力结果, 在8个分区开展空间布局型水污染控制规划方案。在此以外海北岸重污染排水区(W2)为例, 分析实现2个规划期、3类目标、4种情景条件下的规划方案(图6)。其基本步骤为: ①分区内总量控制与削减目标确定, 根据流域容量总量控制方案确定W2分区在3个水质目标下的总量控制目标, 在此基础上根据负荷预测, 确定4种情景条件下的削减目标, 图7举例阐

释了 2020 年和 2030 年 III 类和 IV 类的水质目标情景；②方案设计思路确定，根据分析，W5 区污染控制主要采用的是污染递阶削减技术，其思路为：优先控制点源污染、重点控制面源污染、湿地处理辅助控制以实现控制目标；③规划方案确定与反馈，根据对现有规划方案评估以及规划期不同控制措施的削减能力、投入、适宜性等的综合评估结果，确定该分区在不同情景下、不同规划期的控制方案，核算负荷削减并完成分区规划反馈。

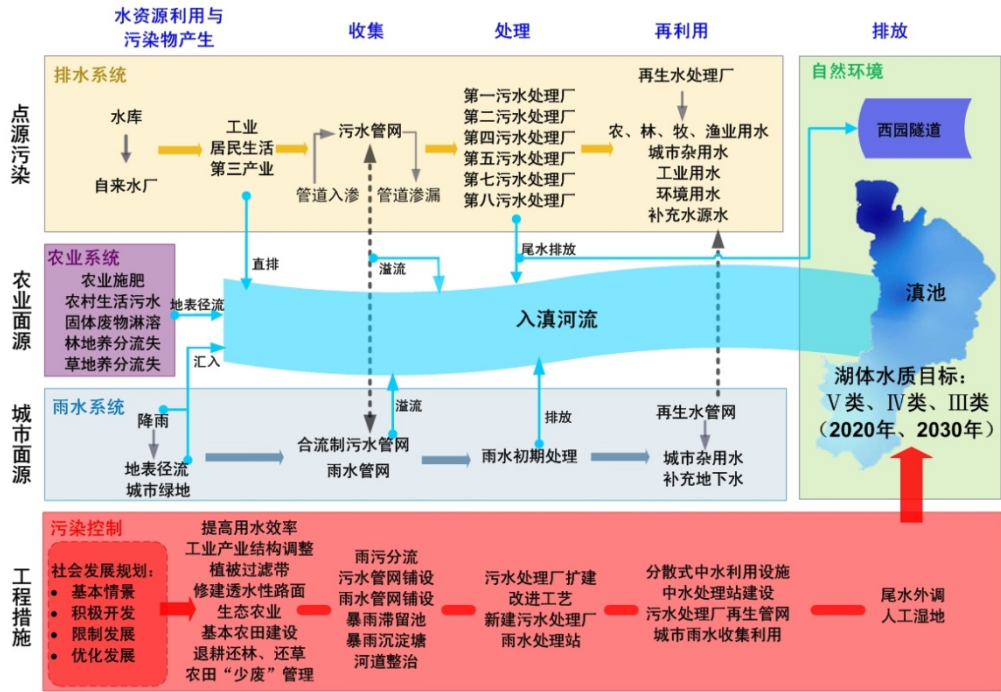
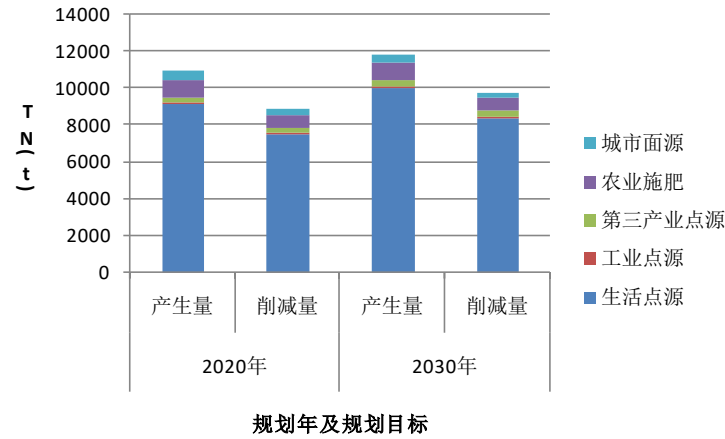


图 6 外海北岸重污染排水区控源规划方案思路图



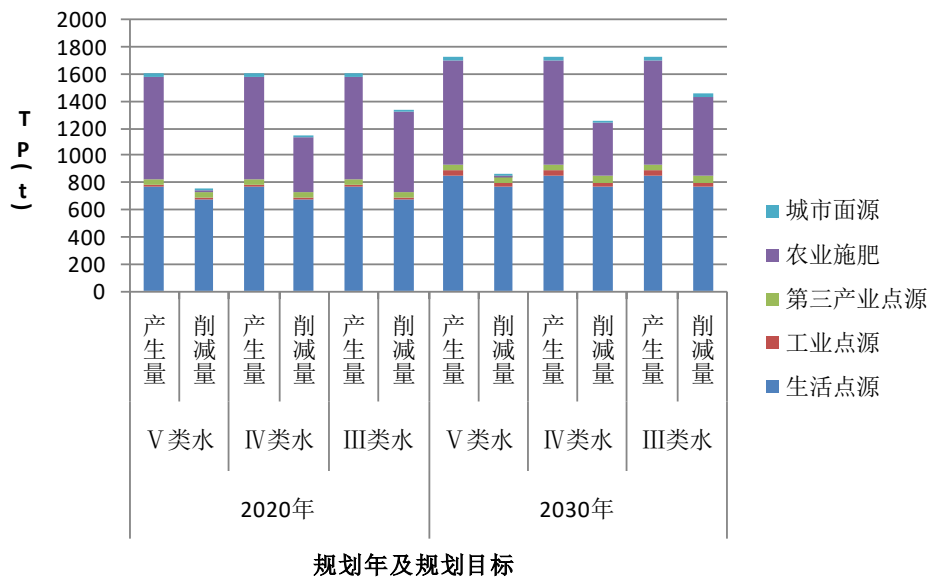


图 7 外海北岸重污染排水区的 TN 和 TP 容量总量削减方案

根据上述分析，本规划区排水系统规划项目共 14 项，包括排水管网系统建设、污水处理设备、水资源再生利用和尾水外调工程。

表 2 外海北岸重污染排水区的工程措施方案库

污染源	项目名称	削减能力	
		TN	TP
城镇点源	污水处理厂升级改造	处理率达 85%	处理率达 97%
	污水管网铺设	完善“排口-关联片区-管网”体系	
城市面源	雨水收集池	清污分流、山洪剥离	
农业面源	退耕还林还草	0.252t/hm ²	0.192 t/hm ²
	农业产业结构调整	0.378t/hm ²	0.0295t/hm ²
末端治理	人工湿地	31t/hm ²	9.2 t/hm ²

同上，确定了滇池流域 8 个分区在 2 个规划期、3 个水质目标、4 种发展情景下的规划方案，在此以 2030 年 III 类水质目标、优化发展情景为例（表 3、图 8），其余水质目标、发展情景和 2020 年的方案同理可得。主要的流域规划方案包括：污水减负与资源化工程、农业结构调整与面源控制工程、引水优化与水质保障工程等，进一步的评估与反馈发现，这些规划方案可以满足不同情景下的水质目标要求。

表 3 2030 年 III 类水质目标、优化发展情景下的流域各分区污染控制方案

控制区	污染控制类型	规划方案	规模	单位	负荷削减目标(t/a)	
					TN	TP
C1	点源和城市面源	污水处理厂	32.3	万 t/d	3530.4	353.2
		中水回用厂	6.9	万 t/d		
		尾水外调	15.9	万 t/d		
		雨污合流污水处理设施	34.7	万 t/d	112.4	6.8
	农业面源	退耕还林还草	15.3	hm ²	7.7	5.1
W2	点源和城市面源	污水处理厂	76.5	万 t/d	8812.2	845.4
		中水回用厂	18.7	万 t/d		
		尾水外调	27.3	万 t/d		
	农业面源	退耕还林还草	1323.8	hm ²	499.7	390.2

	末端控制	人工湿地	7.3	hm ²	226.3	67.2
W3	点源和城市面源	污水处理厂	13.0	万 t/d	1334.9	140.3
		中水回用厂	12.1	万 t/d		
	农业面源	退耕还林还草	2093.0	hm ²	1361.1	541.5
	末端控制	自然湿地	5.8	hm ²	184.4	9.8
		人工湿地	2.6	hm ²		
W4	点源	污水处理厂	20.0	万 t/d	2064.2	220.4
		中水回用厂	19.3	万 t/d		
	农业面源	退耕还林还草	6645.0	hm ²	4096.8	1706.6
	末端控制	湖滨自然湿地	150.0	hm ²	47.3	12.9
		人工湿地	162.0	hm ²	226.1	10.2
W5	点源和城市面源	污水处理厂	5.5	万 t/d	465.4	31.8
		人工湿地	59.1	hm ²	67.1	6.1
	农业面源	退耕还林还草	2585.8	hm ²	0.0	495.6
	末端控制	湖滨自然湿地	171.1	hm ²	53.9	0.6
W6	点源和城市面源	污水处理厂	2.8	万 t/d	201.8	39.1
		人工湿地	23.7	hm ²	52.3	5.0
	农业面源	退耕还林还草	1063.0	hm ²	0.0	203.8
	末端控制	湖滨自然湿地	40.7	hm ²	12.8	0.5
W7	农业面源	清洁农业生产	500.0	hm ²	556.6	177.8
		人工防护林	533.3	hm ²	275.6	103.7
	末端控制	湖滨湿地	103.8	hm ²	14.0	0.9

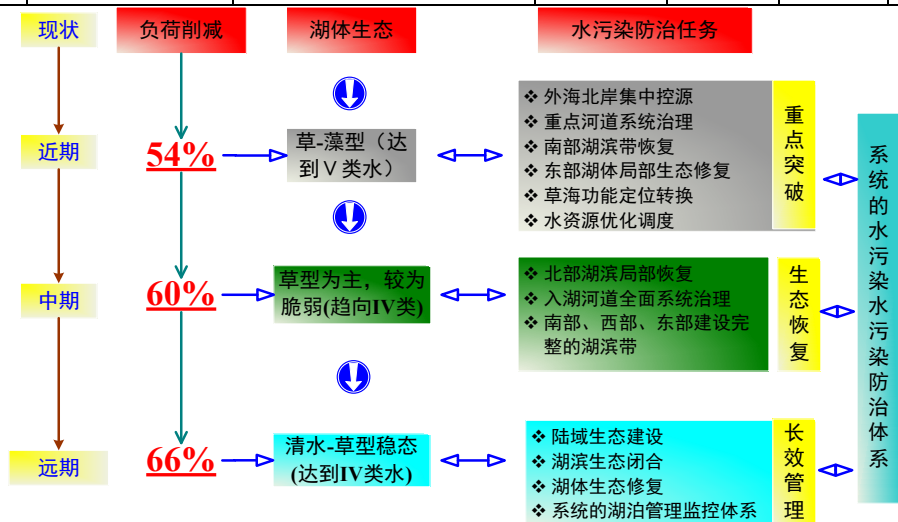


图8 滇池流域水污染治理与富营养化控制中长期路线图