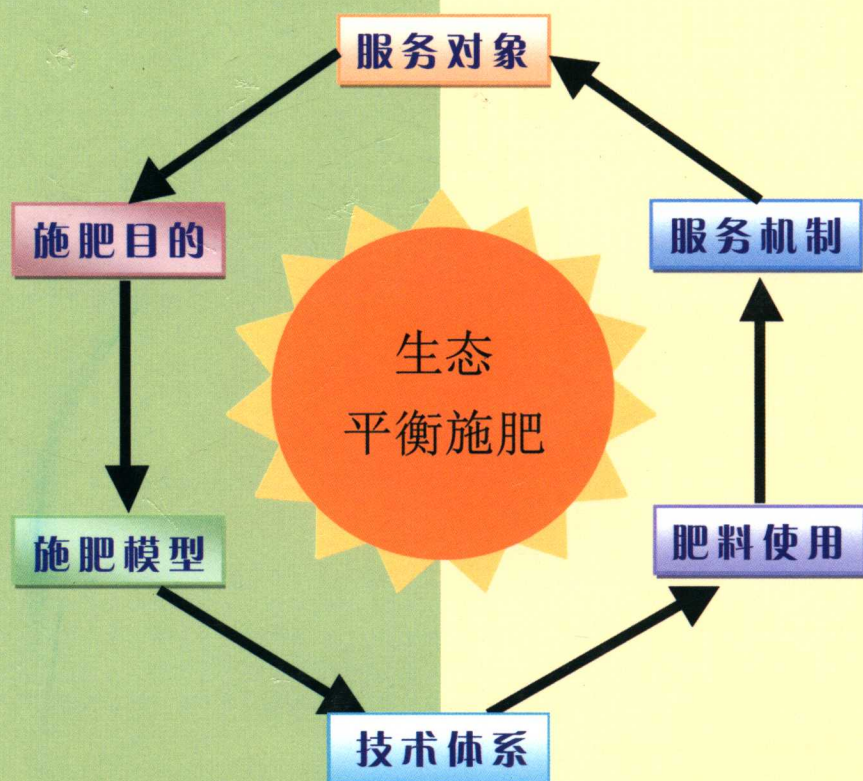


# 生态平衡施肥

## 理论、方法及其应用

Theory, Method and Application of Ecological Balanced Fertilization

侯彦林◎著



S147.2

69

# 生态平衡施肥理论、 方法及其应用

Theory, Method and Application of Ecological  
Balanced Fertilization

侯彦林 著

中国农业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

生态平衡施肥理论、方法及其应用/侯彦林著. —  
北京: 中国农业出版社, 2014. 12  
ISBN 978-7-109-20039-5

I. ①生… II. ①侯… III. ①生态平衡-施肥 IV.  
①S147.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 304932 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 贺志清

---

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行  
2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月北京第 1 次印刷

---

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 22.5

字数: 510 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 120.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

## 内 容 简 介

全书内容分为 21 章，总结了过去 17 年来的科研成果，主要包括生态平衡施肥理论和方法、生态平衡施肥理论和方法应用、生态平衡施肥系列软件。

本书可供从事农学、生态学、地理学的科学工作者以及大专院校相关专业师生参考。

## 编 委 会

主 编：侯彦林

参编人员：郑宏艳 刘书田 米长虹

黄治平 王 农 蔡彦明

周 燕 任 军 王铄今

侯显达

# 前 言

施肥是一个古老的话题，也是当今与国家、企业、农民和现实社会中每一个人都密切相关的农业实践活动。“民以食为天”，说明吃饭是任何社会的头等大事；“食以土为本”，说明作物离不开土壤；“土以肥为根”，说明土壤的本质特性是为作物生长发育提供营养。我们每一天都离不开粮食和其他各种农产品，同样，作物每一天也离不开土壤；当土壤里原有的养分不足时，就必须通过人为的方式补充，即施肥；如果不施肥，作物就不会有合适的产量；施肥少了，产量会低，施肥多了，品质可能会差，同时也可能带来环境和农产品的污染。

生态平衡施肥是一个崭新的概念，多年来，我们围绕这一概念的理论和方法进行了系统研究，并结合自 2005 年以来全国性的测土配方施肥工作，研制出了系列施肥专家系统软件，做过 300 场以上学术交流和培训，目前全国有一半以上的省合计 500 个以上县土肥站及其他用户使用。2000 年提出了基于土壤有效养分平衡的生态平衡施肥通用模型，它吸收了以往各类传统施肥模式的优点，建立了以往施肥参数向生态平衡施肥参数的转化方法，使生态平衡施肥可以实现定量化。2011 年提出了基于土壤全量养分平衡的生态平衡施肥通用模型、肥料转化率概念和计算方法，它解决了生态平衡施肥的肥料利用率计算方法，同时也解决了土壤培肥率和肥料离土率的计算方法。按肥料转化率算法计算结果，与常规肥料利用率算法相比，我国肥料多年平均利用率为 40%~60%。以我国每年实际肥料折纯量 5 460 万 t 为基数，每吨纯养分按 4 000 元计算，氮、磷、钾肥料利用率统一按提高 20% 计算，每年增加效益为 436.8 亿元，这部分效益以前被错误的计算方法掩盖了，同时肥料污染环境的负荷也相应地减少了。



本书是作者 1998 年提出生态平衡施肥概念以来的理论研究成果和实践活动的总结，全书分二十一章，主要包括生态平衡施肥理论和方法、生态平衡施肥理论和方法应用、生态平衡施肥系列软件。本书内容跨越 17 年时间完成，在本书最后编辑过程中得到了团队成员齐心协力的帮助。

我多次在学术交流和培训会上说的一句话是：生态平衡施肥体系一半的贡献归属于我的老师——施肥第一线技术推广人员，我只是提出理论假设、验证、信息化和培训的人。

感谢中国科学院百人计划项目、中国科学院扶贫项目、中国科学院大学院长基金项目、自然科学基金项目、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目（2011-WN-8）、中国农业科学院科技创新工程（2014-cxgc-hyl）等项目的资助。该书的出版获得中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目（2011-WN-8）、中国农业科学院科技创新工程（2014-cxgc-hyl）项目经费的支持，在此表示感谢。

由于水平所限，不足之处在所难免，恳请大家批评指正。

侯彦林

2014 年 10 月 7 日

# 目 录

## 前言

<b>第一章 生态平衡施肥理论和方法体系</b> .....	1
第一节 生态平衡施肥服务对象 .....	2
第二节 生态平衡施肥目的 .....	8
第三节 生态平衡施肥模型 .....	9
第四节 生态平衡施肥技术体系 .....	12
第五节 生态平衡施肥肥料使用 .....	15
第六节 生态平衡施肥服务机制 .....	17
<b>第二章 基于有效养分的生态平衡施肥模型</b> .....	22
第一节 施肥模型的意义 .....	22
第二节 施肥模型国内外发展概述 .....	23
第三节 基于有效养分的生态平衡施肥模型建立 .....	33
<b>第三章 生态平衡施肥模型与目标产量施肥模型比较研究</b> .....	48
第一节 目标产量施肥模型综合评述 .....	48
第二节 生态平衡施肥模型应用实例 .....	52
第三节 结论 .....	53
<b>第四章 生态平衡施肥模型与肥料效应函数模型关系研究</b> .....	55
第一节 特征参数模型和生态平衡施肥模型一般应用表达式推导 .....	55
第二节 区域特征参数模型和区域生态平衡施肥模型理论推导 .....	57
第三节 生态平衡施肥模型与肥料效应函数模型关系 .....	58
第四节 生态平衡施肥模型应用程序举例 .....	59
第五节 结论和展望 .....	61



<b>第五章 区域生态平衡施肥模型</b> .....	63
第一节 区域生态平衡施肥模型需求分析 .....	63
第二节 生态平衡施肥模型中的特征参数 .....	63
第三节 区域施肥模型的建立 .....	64
第四节 区域施肥模型的应用 .....	65
第五节 关于区域施肥模型中参数的讨论 .....	66
<b>第六章 不测土半定量生态平衡施肥模型</b> .....	68
第一节 不测土半定量施肥模型的需求 .....	68
第二节 不测土施肥模型介绍 .....	68
第三节 不测土生态平衡施肥模型原理和方法 .....	70
<b>第七章 生态平衡施肥追肥预测方法</b> .....	76
第一节 确定追肥量的“天—地—作物概念模型” .....	77
第二节 确定追肥量的通式 .....	77
第三节 确定追肥修正参数的方法 .....	78
第四节 N 肥波动性和单产波动性研究 .....	81
第五节 结论和展望 .....	82
<b>第八章 土壤有效养分测试方法研究</b> .....	85
第一节 推荐土壤速测方法中饱和浸提液的制备和浸提剂的选择 .....	85
第二节 速测技术的改进 .....	88
第三节 新速测方法的特点 .....	89
第四节 土壤速效养分测定方法 .....	89
<b>第九章 基于全量养分的生态平衡施肥模型</b> .....	95
第一节 肥效评价的生态平衡施肥理论体系、指标体系及其实证 .....	95
第二节 肥效评价的生态平衡施肥指标体系的应用 .....	107
第三节 通用施肥模型及其应用 .....	115
<b>第十章 基于全量养分的生态平衡施肥模型的应用</b> .....	128
第一节 生态平衡施肥田间试验方法 .....	128
第二节 氮肥利用率和氮肥转化率算法比较研究 .....	128
第三节 磷肥利用率和磷肥转化率算法比较研究 .....	152
第四节 区域土壤 NP 培肥率和离土率测算举例 .....	159

<b>第十一章 与生态平衡施肥理论和方法体系相关的问题</b> .....	163
第一节 生态平衡施肥模型与传统施肥模型关系 .....	163
第二节 生态平衡施肥模型中定量化指标的计算和使用问题 .....	165
第三节 关于产量问题 .....	168
第四节 影响大量元素肥效的因素 .....	169
第五节 其他相关的问题 .....	171
第六节 测土配方的十个误区 .....	175
<b>第十二章 生态平衡施肥专家系统软件设计</b> .....	180
第一节 总体设计 .....	180
第二节 软件流程设计 .....	180
第三节 系列软件设计 .....	183
第四节 施肥卡种类设计 .....	185
<b>第十三章 生态平衡施肥专家系统系列软件</b> .....	204
第一节 网络施肥专家系统 .....	204
第二节 网络触屏施肥软件 .....	229
第三节 网络手机施肥软件 .....	238
第四节 网络售肥软件 .....	243
第五节 网络电子地图施肥软件 .....	243
第六节 网络省地施肥管理软件 .....	246
第七节 网络 GIS 施肥软件 .....	246
第八节 单机施肥软件 .....	248
第九节 单机触屏施肥软件 .....	262
第十节 单机配肥软件 .....	275
<b>第十四章 生态平衡施肥专家系统用户软件</b> .....	276
第一节 吉林省施肥软件应用情况 .....	276
第二节 内蒙古区施肥软件应用情况 .....	276
第三节 辽宁省施肥软件应用情况 .....	277
第四节 青海省施肥软件应用情况 .....	277
第五节 黑龙江农垦总局施肥软件应用情况 .....	277
第六节 重庆市施肥软件应用情况 .....	277
第七节 杭州市林业科技推广总站施肥软件 .....	278
第八节 与施肥软件结合的其他软件 .....	278

<b>第十五章 复混(合)肥配方软件设计原理和方法</b> .....	279
第一节 复混(合)肥配方软件设计原理和方法 .....	279
第二节 复混(合)肥配方软件设计 .....	280
第三节 软件具体应用举例 .....	283
<b>第十六章 生态平衡施肥专家系统软件使用常见问题</b> .....	285
第一节 有关施肥模式问题 .....	285
第二节 有关施肥参数问题 .....	288
第三节 有关地块施肥问题 .....	288
第四节 有关施肥卡问题 .....	289
第五节 有关推荐肥料问题 .....	291
<b>第十七章 生态平衡施肥技术产业化模式和机制研究</b> .....	292
第一节 我国施肥系统物质流、货币流、技术流和信息流流动规律分析 .....	292
第二节 生态平衡施肥技术产业化的技术体系 .....	294
第三节 生态平衡施肥技术产业化模式和机制 .....	294
第四节 生态平衡施肥技术产业化服务体系 .....	296
第五节 测土配方施肥信息化任务 .....	296
<b>第十八章 化肥需求预测方法</b> .....	298
第一节 基于肥料转化率的预测方法 .....	298
第二节 其他预测方法 .....	302
<b>第十九章 中国农田氮面源污染研究</b> .....	304
第一节 农田氮面源污染研究现状 .....	304
第二节 中国农田氮面源污染类型区划 .....	305
第三节 分省污染趋势分析 .....	307
第四节 分省污染趋势分析结果 .....	310
第五节 中国农田氮面源污染评价指标体系的初步制定 .....	311
第六节 估算模型的实证 .....	319
第七节 各类型区污染程度和趋势 .....	324
第八节 综合结论 .....	327
<b>第二十章 复合生态系统平衡模型的建立及其应用</b> .....	331
第一节 SENCE 有效物质(能量、货币)平衡模型及其特征参数 .....	331

---

第二节	ASBM 的应用 .....	333
第三节	结论和讨论 .....	336
<b>第二十一章</b>	<b>生态平衡施肥理论和方法体系展望 .....</b>	<b>338</b>
第一节	关于施肥理论 .....	338
第二节	关于施肥方法 .....	340
第三节	关于肥料田间试验 .....	340
第四节	关于测土配方施肥的数据挖掘 .....	341
第五节	关于推荐施肥软件 .....	341
第六节	关于推荐施肥服务终端 .....	341
第七节	关于测土配方施肥覆盖面 .....	341
第八节	关于测土配方施肥数据成果转化的问题 .....	342
第九节	关于服务模式 .....	342
第十节	关于肥料销售和服务电子商务平台 .....	342
第十一节	关于建立施肥 TMT 产业服务平台的设想 .....	342

# 第一章 生态平衡施肥理论和 方法体系

施肥是与产量、品质、成本、土壤培肥、农产品和包括土壤污染在内的环境污染等问题密切相关的复合生态系统物质循环调控的重要措施（侯彦林，2000a），是关系到社会稳定、经济发展和生态环境保护的民生工程。生态平衡施肥理论和方法体系是以实现经济效益、生态效益和社会效益的综合效益最佳为目标而提出和建立的，它由六部分构成一个有机整体，即服务对象、施肥目的、施肥模型、技术体系、肥料使用和服务机制（侯彦林，2000a，2008a）。

生态平衡施肥理论和方法体系（侯彦林，2000b，2008a）：服务对象是一个可持续发展区域而非传统意义上的一块农田；施肥目的是实现兼顾产量、品质、成本、土壤培肥、农产品和环境污染等问题的优化目标；施肥模型是以建立在物质守恒定律和有效或全量养分转化关系基础上的通用施肥模型为理论基础的一整套定量化施肥诊断和推荐方法，包括特征参数试验方法、数据挖掘方法和施肥预报方法等；技术体系是以实用和高新技术优化组装为实现手段，包括肥料改性、根域或肥域土壤条件改善、养分测试方法、肥料田间试验方法、养分再利用和循环技术、田间施肥技术等；肥料使用是以生态型肥料为载体，同时满足高产、优质、效益、土壤培肥和没有污染等多目标的最佳肥料投入组合；服务机制是指能够将政府资源、企业效益、农民利益等结合在一起，最终实现测土—配方—配肥—施用的科技型施肥电子商务平台的运行。

这六方面的关系是：服务对象是根本，它是我们制定政策、措施和使用技术的依据；施肥目的是落实服务对象的具体体现和所要达到的具体标准；理论基础是保证达到施肥目的的科学依据；技术体系是保证达到施肥目的的技术手段；肥料使用是实现施肥目的的具体载体；服务体系是最后一个环节，是以上有形和无形的五个方面落实到基层、农户和田间的具体流程和方式。这六个方面相互影响和促进，构成完整的生态平衡施肥理论和方法体系。

具体的生态平衡施肥是以生态平衡施肥理论为基础，以生态平衡施肥技术体系为手段，以生态型肥料为载体的施肥方式；它将农田、农业、农村、城镇和化工业连接在一起，通过对复合生态系统物质循环特征的综合分析和诊断，将现有成熟技术因地制宜进行优化组装，通过 3R 途径相对减少肥料投入量（Reduce），提高投入质量；挖掘土壤中无效化养分（Reuse）和使流出到系统外的养分再加入到系统内而实现养分再循环（Recycle），进而调整地质学大循环和生物学小循环的养分循环过程，是实现施肥系统的经济效益、社会效益和生态效益综合效益的最佳方式和方法。

## 第一节 生态平衡施肥服务对象

### 一、问题的提出

传统施肥服务对象是一具体地块，农户关注的只是这块地的收成，在以化肥施用为主的今天，农户常常关心肥料投入成本，较少关注粮食品质、土壤肥力变化以及地下水和周边水域的污染。

### 二、问题的本质

生态平衡施肥服务对象是一个可持续发展区域而非传统意义上的一块农田，它将施肥的个体行为上升到国家层面，即施肥必须考虑产量、品质、成本、土壤培肥、农产品和环境污染五方面问题（侯彦林，2000b），其根本原因是施肥在给作物供应养分的同时，也有相当部分的养分残留在土壤中，或在当季或在以后随水流到地下水或周边水体中，引起水体富营养化，导致水生植物茂盛生长，过量消耗水中的氧气，恶化水质，甚至鱼虾难以存活，其中氮和磷的危险性最大。

图 1-1 是施肥引起的面源污染示意图。肥料施在农田上，降水或灌溉将使部分肥料在作物生长期或休闲期或以后，随水流到低洼处或在土壤剖面内垂直向下渗漏，最终流到河流、湖泊和海洋中。施肥过量、降水集中或大水灌溉、丘陵地貌和砂质土壤等因素都将加剧肥料的流失，久而久之，聚少成多，肥料引起的面源污染就成为一个区域性的乃至世界性的难题。

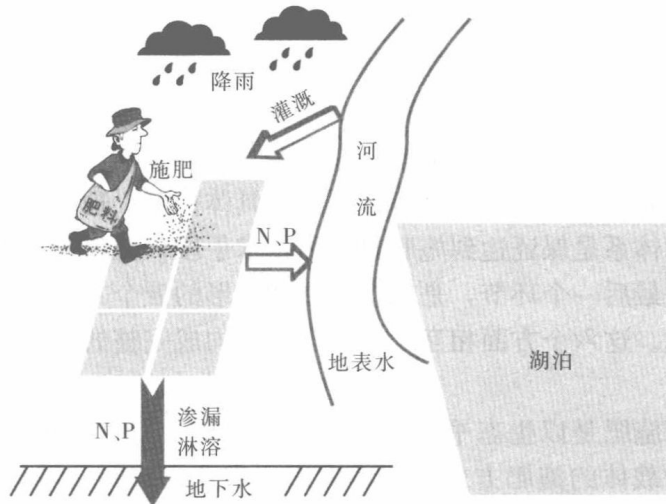


图 1-1 施肥引起的面源污染示意图

平衡施肥服务对象在中国以往主要是农田生态系统，由于肥料面源污染的影响，在发达国家施肥服务对象已经扩大到区域。生态平衡施肥既要保证施肥增产粮食，又不至于引起区域性水体、土壤、地下水和农产品污染。为实现此目的，不但要把生态平衡施肥理念作为一种技术体系，而且还应作为一种政策或法规。只有这样，由肥料面源污染引起的河湖和海水的污染才能得到根本性的控制。所以，生态平衡施肥服务对象定义为包括农田生



态系统在内的区域性社会—经济—自然复合生态系统。

### 三、施肥污染的相关证据

点源污染可以通过关闭工厂和建立农村污水处理厂或站的方式得到解决，但是由于施肥是农业的必需措施之一，减少施肥可能直接关系农户的收入，所以至今也未能在施肥上提供能够同时兼顾产量和污染防治的有效技术和模式。

#### (一) 湖泊污染

农村面源污染为湖泊主要污染源之一，主要包括畜禽养殖、种植业和农村生活污染。据统计，2010年巢湖流域农村面源污染源化学需氧量(COD)、总磷、总氮排放量分别为52 378t、3 556t和20 257t，占流域污染总量的31.8%、44.5%和30.8%，预测到2020年，巢湖流域农村面源污染源COD、总磷、总氮排放量分别为45 943t、3 068t和19 297t，占总量的26.62%、49.28%和37.64%（巢湖流域水环境综合治理总体方案，2008）。

表1-1为近年全国废水中主要污染物排放量，由表1-1可知，2011年农业源的化学需氧量和氨氮排放量分别约为排放总量的47.5%和32%（中国环境状况公报，2011，2013）。

表1-1 近年全国废水中主要污染物排放量

年度	化学需氧量(万t)					氨氮(万t)				
	排放总量	工业源	生活源	农业源	集中式	排放总量	工业源	生活源	农业源	集中式
2011	2 499.9	355.5	938.2	1 186.1	20.1	260.4	28.2	147.6	82.6	2.0
2013	2 352.7	319.5	889.8	1 125.7	17.7	245.7	24.6	141.4	77.9	1.8

表1-2为近年重点湖库的水质类别（中国环境状况公报，2009，2010，2011，2012，2013），由表1-2可知，主要污染指标为总磷和化学需氧量（总氮未参与水质评价）。2013年，水质为优良、轻度污染、中度污染和重度污染的国控重点湖泊（水库）比例分别为60.7%、26.2%、1.6%和11.5%。与2012年相比，各级别水质的湖泊（水库）比例无明显变化。主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。

表1-2 近年重点湖库水质类别

年度	湖库类型	个数	I类	II类	III类	IV类	V类	劣V类	主要污染指标
2009	三湖*	3	0	0	0	0	巢湖	太湖、滇池	总氮、总磷
	大型淡水湖	9	0	0	3	2	1	3	
	城市内湖	5	0	0	0	2	1	2	
	大型水库	9	0	1	2	2	2	2	
	总计	26	0	1	5	6	5	9	
	比例(%)		0	3.9	19.2	23.1	19.2	34.6	

## 生态平衡施肥理论、方法及其应用

(续)

年度	湖库类型	个数	I类	II类	III类	IV类	V类	劣V类	主要污染指标
2010	三湖*	3	0	0	0	0	巢湖	太湖、滇池	总氮、总磷
	大型淡水湖	9	0	0	3	0	3	3	
	城市内湖	5	0	0	0	2	1	2	
	大型水库	9	0	1	2	2	1	3	
	总计	26	0	1	5	4	6	10	
	比例 (%)		0	3.8	19.2	15.4	23.1	38.5	
2011	三湖*	3	0	0	0	太湖	巢湖	滇池	总磷、化学需氧量
	大型淡水湖	9	0	0	1	4	3	1	
	城市内湖	5	0	0	2	3	0	0	
	大型水库	9	1	4	3	1	0	0	
	总计	26	1	4	6	9	4	2	
	比例 (%)		3.8	15.4	23.1	34.6	15.4	7.6	
2012	三湖*	3	0	0	0	2	0	1	总磷、化学需氧量 和高锰酸盐指数
	重要湖泊	32	2	3	8	12	1	6	
	重要水库	27	3	10	12	2	0	0	
	总计	62	5	13	20	16	1	7	
	比例 (%)		8.1	20.9	32.3	25.8	1.6	11.3	
2013	—	—	优 (个)	良好 (个)	轻度污 染 (个)	中度污 染 (个)	重度污 染 (个)	—	总磷、化学需氧量 和高锰酸盐指数
	三湖*	3	0	0	太湖、巢湖	0	滇池	—	
	重要湖泊	31	5	9	10	1	6	—	
	重要水库	27	12	11	4	0	0	—	
	总计	61	17	20	16	1	7	—	
	比例 (%)		27.9	32.8	26.2	1.6	11.5	—	

\* 三湖是指太湖、滇池和巢湖。

表 1-3 为我国近年重点大型淡水湖泊水质状况 (中国环境状况公报, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013), 由表 1-3 可知, 湖泊主要污染指标为总氮和总磷。

表 1-3 近年重点大型淡水湖泊水质状况

年度	名称	营养状态指数	营养状态	水质类别	主要污染指标
2009	达赉湖	67.7	中度富营养	劣V	pH、高锰酸盐指数、总磷
	白洋淀	59.5	轻度富营养	劣V	氨氮、总氮、总磷
	洪泽湖	58.0	轻度富营养	劣V	总氮、总磷
	鄱阳湖	50.6	轻度富营养	IV	总磷、总氮
	南四湖	49.6	中营养	IV	石油类、总磷、总氮

第一章 生态平衡施肥理论和方法体系

(续)

年度	名称	营养状态指数	营养状态	水质类别	主要污染指标
2009	洞庭湖	48.1	中营养	V	总磷、总氮
	洱海	41.0	中营养	III	—
	镜泊湖	40.2	中营养	III	—
	博斯腾湖	38.8	中营养	III	—
2010	达赉湖	65.2	中度富营养	劣V	高锰酸盐指数、总磷、总氮
	白洋淀	60.3	中度富营养	劣V	氨氮、总磷、总氮
	洪泽湖	58.2	轻度富营养	V	总磷、总氮
	鄱阳湖	51.5	轻度富营养	V	总磷、总氮
	南四湖	50.7	轻度富营养	V	总磷
	洞庭湖	50.4	轻度富营养	劣V	总氮、总磷
	洱海	43.3	中营养	III	—
	博斯腾湖	38.1	中营养	III	—
2011	达赉湖	—	中度富营养	劣V	化学需氧量、总磷和氨氮
	白洋淀	—	轻度富营养	V	化学需氧量、总磷和氨氮
	洪泽湖	—	轻度富营养	V	化学需氧量、总磷和氨氮
	鄱阳湖	—	中营养	IV	化学需氧量、总磷和氨氮
	南四湖	—	轻度富营养	V	化学需氧量、总磷和氨氮
	洞庭湖	—	中营养	IV	化学需氧量、总磷和氨氮
	洱海	—	中营养	III	—
	博斯腾湖	—	中营养	IV	化学需氧量、总磷和氨氮
2012	达赉湖	—	重度污染, 中度富营养	—	—
	白洋淀	—	重度污染, 中度富营养	—	—
	洪泽湖	—	中度污染	—	总磷
	鄱阳湖	—	中营养	—	—
	南四湖	—	轻度污染, 轻度富营养	—	—
	洞庭湖	—	轻度污染, 中营养	—	总磷
	洱海	—	水质良好, 中营养	—	—
	博斯腾湖	—	轻度污染, 中营养	—	—
2013	达赉湖	—	轻度富营养	—	—
	白洋淀	—	重度污染, 中度富营养	—	—
	洪泽湖	—	重度污染, 轻度富营养	—	—
	鄱阳湖	—	轻度污染, 中营养	—	—