

瑞士生态农业措施治理水体富营养化及其效果介绍^①

黄 标¹, Emmanuel Frossard², 孙维侠¹, 胡文友¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;

2 苏黎世瑞士联邦工学院, Lindau CH-8315)

摘要: 本文介绍了瑞士自 20 世纪 60 年代以来, 通过生态农业措施治理湖泊富营养化的情况, 分别介绍了政府决策、基础研究、治理措施、治理效果等方面的内容。并就我国环境治理工作提出了一些看法。

关键词: 水体富营养化; 决策; 基础研究; 治理措施; 瑞士

中图分类号: S154.1; X52

2010 年, 笔者受中瑞科技合作基金资助对瑞士联邦高等工学院进行了两次访问, 参观了一些野外试验设施, 走访了一些农户, 也游览了一些旅游景点, 所到之处无不为这里清洁的环境、绮丽的风光发出由衷的赞叹。流经苏黎世市的河流及市区边的苏黎世湖湖水清澈见底, 不同大小的鱼儿在河流和湖泊中自由地游来游去, 实在让人无法想象, 究竟是什么样的措施使得瑞士的水环境保护得如此之好?

据接待我的 Frossard 教授介绍, 瑞士在 20 世纪 70—80 年代, 由于农业的高度发展, 也曾出现过严重的水环境问题, 一些地区, 甚至出现由于湖水富营养化导致鱼类大量死亡的生态事故, 后来在政府和社会的努力下采取了一系列有效的生态农业措施, 使环境面貌发生了明显的改观, 这更加引起了我的兴趣。我国近年来的发展也出现了同样的生态环境问题, 是否有一些经验值得我们借鉴? 本文从瑞士政府决策、基础研究、措施应用等方面介绍瑞士在过去 30 多年中为保护和治理水环境采取的生态农业措施及其效果, 旨在为我国生态环境保护和治理提供参考。

1 瑞士农业简介

瑞士是位于阿尔佩斯山脉中的西欧小国, 国土面积仅 $41\ 300\ km^2$, 仅为我国的 0.43%, 其中 55% 为山地。由 3 个地貌单元组成 (图 1), 南部的阿尔佩斯山, 北部的汝拉山, 中间夹一个瑞士高原。全国总人口 730 万。

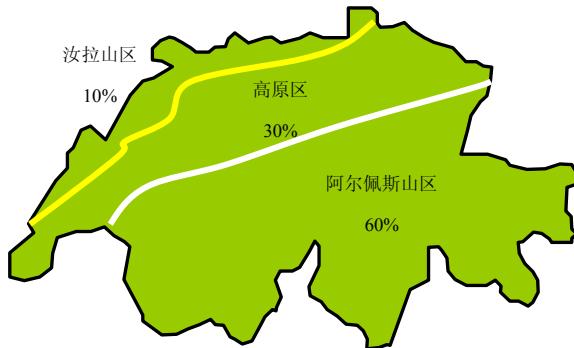


图 1 瑞士地貌分区简图

Fig. 1 Sketch of topographical regionalization in Switzerland

土地利用状况 (图 2): 被利用的农业用地 $10\ 300\ km^2$ (占国土面积的 25%)、林地 $12\ 000\ km^2$ (29%)、阿尔佩斯山区的牧场 $5\ 800\ km^2$ (14%)、水域 $2\ 900\ km^2$ (7%)、建筑用地 $2\ 500\ km^2$ (6%)、另还有 $7\ 800\ km^2$ (19%) 的未利用土地。目前全国共有家庭农场 60 900 户, 平均每户拥有 $17.4\ hm^2$ 的农场面积。如果按全国人口算, 平均每人拥有 $0.22\ hm^2$ 耕地, 这在欧洲来说, 人均耕地面积已相当低了。

瑞士的农产品以动物产品为主, 动物产品的产值占农业总产值的比例高达 70%。尤其是奶制品, 全国有 1.6 万头牛, 奶制品占农业产值的比例高达 36%。其他则生产谷类、土豆、甜菜、油料作物、水果、蔬菜等。应该说, 瑞士土地的农业利用强度还是比较高的, 在瑞士高原旅行, 到处看到的都是成片的农田和

^①基金项目: 中瑞科技合作项目 (EG03092009) 和国家自然科学基金项目 (41071299, 40773075) 资助。

作者简介: 黄标 (1962—), 江苏如皋人, 博士, 研究员, 主要从事土壤资源演变和土壤地球化学研究。E-mail: bhuang@issas.ac.cn

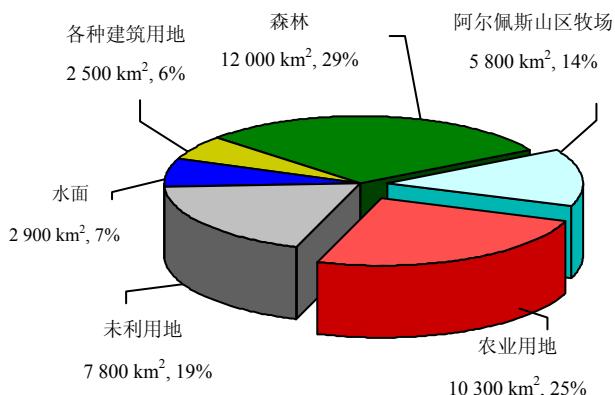


图 2 瑞士土地利用状况

Fig. 2 Land use in Switzerland

牧场。这样较高强度的农业利用现状，对其生态环境

影响的压力还是挺大的。

2 高强度农业利用对生态环境造成的影响

高强度农业利用对生态环境的影响在 20 世纪 70—80 年代达到高潮。据统计，瑞士农业生产过程中产生的过剩（输入和输出差）N 素从 1975 年的 11.4 万 t 增加到 1980 年的 14.0 万 t；农业氨挥发从 1950 年的 4.2 万 t 增加到 1980 年的 5.7 万 t；饮用井水中硝酸盐含量从 1953 年的 9 mg/L 增加到 1987 年的 22 mg/L。P 的过剩在 1980 年达到 2.7 万 t；一些湖泊中的全 P 含量大幅增加，如 Lucerne 州 Baldegg 湖的总 P 含量从 1955 年的 0.1 mg/L 上升到 1975 年的 0.5 mg/L，导致湖泊蓝藻爆发，鱼类大量死亡（图 3）^[1]。



图 3 20 世纪 70 年代发生在瑞士 Lucerne 州湖泊富营养化

Fig. 3 Water eutrophication happened in 1970s in the lakes of Lucerne Kanton, Switzerland

调查表明，20 世纪 70—80 年代，受瑞士农业快速发展的影响，野生动物和植物多样性减少。20 世纪 50 年代至 80 年代，95% 的湿地水分均被排干，同时还存在一定面积的土壤侵蚀。另一方面，社会经济的快速发展也在威胁着农业生态环境，据测算，全国平均每一秒钟就有 1 m² 的土壤面积被其他建筑项目侵占。大量的再循环废弃物和大气污染沉降已导致全国有 1 万 hm² 土壤受到重金属污染。

3 国际国内政治经济形势对农业生产的影响

国际上，从 20 世纪 70 年代开始，由于瑞士和欧盟国家间的自由贸易以及和其他国家自由贸易协议的签署，政府必须进一步降低农产品的进口关税，降低对农业生产的补贴，也要降低农产品出口的补贴，以满足国际贸易组织减少贸易保护的要求，至 90 年代，已经完全取消了关税和各种补贴，这些政策对农民的收入造成了很大的压力。

国内的政治经济形势对农业生产影响也较大。国民要求能够消费到足够的、安全的和便宜的食物，因为有 40% 的作物产品和 100% 的动物产品来自其自身的农业生产。国民又要求尊重动物的生存权，同时要求农业生产能够保持环境友好。另外，瑞士也需要由于农业生产而创造的景观多样性，因为这对旅游业的发展、吸引高新工业和人才至关重要。然而，这些要求仅靠农业生产本身是很难达到的。

4 政府关于改善农业生态环境的决策

面对湖泊富营养化不断加剧的形势，政府有关部门，从 20 世纪 80 年代开始，在局部地区开展了生态环境治理工作，主要是通过一些农学措施来控制土壤中养分的过度残留和流失。同时，对志愿参加的农户给予经济补偿，补偿他们实施生态农业措施而造成的经济损失，资金由联邦政府（80%）和州政府（20%）共同承担。

随着实施项目地区和参加农民的不断增加, 在1996年, 瑞士联邦政府就瑞士农业的作用进行了全民投票, 并通过了宪法条款。条款指出, 为了保证农业可持续发展, 满足市场需求, 瑞士联邦政府必须致力于: ①保障全体人口的食物安全; ②保护自然资源基础和农村景观; ③保证土地利用的多样性 (法律条文art 104, al 1); 联邦政府需致力于采取相应的措施保证农业能够实现多重作用。对于农民因执行特殊的生态措施, 政府将给予合理的直接补偿 (art 104, al 3, lett A)^[2]。将这些观念和义务通过宪法的形式确定下来, 用来指导今后的农业生产发展和生态环境改善。

5 有关农业生态环境的调查研究

从1985年以来, 瑞士各地区相继启动了多个项目来调查农业生态环境状况, 阐明湖泊水体富营养化的原因、研究土壤中营养元素的循环、开发控制土壤养分流失的技术方法等, 如在Lucerne州先后启动了“技术措施 (Technical measures)”、“信息和咨询 (Information and consulting)”、“综合生产 (Integrated production)”和“减磷 (Phosphorus project)”等项目, 不断推动生态农业措施的实施。实施的调查工作包括: 详细调查了全国所有耕地的载畜量, 获得了耕地载畜

量的空间分布图; 调查了各个湖泊基本特征, 包括湖面面积、最大深度、湖水滞留时间、平均流量等; 调查了湖泊流域的基本特征, 包括流域面积、降雨量、不同利用方式的土地面积等^[1]; 研究了典型湖泊内土壤P素分布状况及其影响因素, 从宏观上了解P素平衡状况、流域内的循环过程, 分析湖泊水体富营养化产生的原因, 结合土壤管理现状确定土壤P素管理的途径和方向, 通过研究改变了以往的一些不正确的认识。早在20世纪70年代, 人们普遍认为草场较少受到侵蚀, P素在土壤中活动性较弱, 地表很少看到径流, 农场场院仅仅作为一个P的点源, 所以, 都认为废水是P素的主要来源, 并不把农业活动作为环境中P素的重要来源。但通过调查发现, 随着农业的发展, 从农业活动带来的P素损失越来越多, 从20世纪60年代开始, 土地的载畜量已经超过P素平衡管理的范围 (图4A); 20世纪70年代, 在同一个流域内, 如果土壤农业利用的面积所占比例越高, 农业P的损失就越高^[3] (图4B); 这些都已经成为水体中主要的P素来源。调查中还发现了一些农业生产中不合理的生产措施, 如在雪地和冻土上施用农场动物废弃物; 农场内排污系统不健全, 动物废水常进入下水道, 排入河流等。

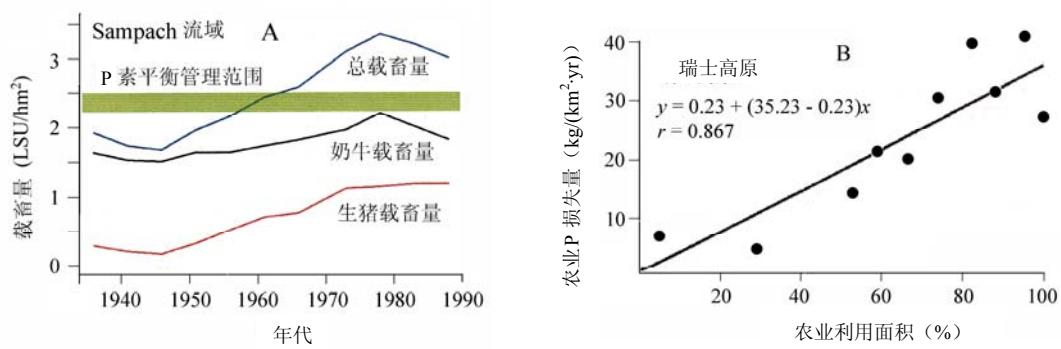


图4 土地载畜量 (LSU) (A) 和土地农业利用率 (B) 与 P 素养分平衡管理之间的关系

Fig. 4 Relationship between land livestock unit (LSU) (A) and agricultural use rate (B) and P nutrient balance management

除了这些调查工作外, 同时也进行了一些基础性的研究工作。在N素循环研究方面, 瑞士联邦工学院植物营养课题组相继开展了“种植系统影响下土壤作物系统内N素动力学”、“农田系统中有机肥料N的去向”, “豆科作物对土壤N素输入的贡献”等方面的研究工作。通过研究发现传统的农业种植系统中, 大量使用的动物肥料在短期内对作物的有效性不高, 导致大量N未被作物利用而进入环境; 确定了不同豆科作物在各种管理措施下N素固定的量^[4]。同样, 课

题组还联合学院的水科学研究组开展了“种植系统影响下土壤作物系统内P素动力学”的研究工作, 详细研究了新鲜牛粪施入土壤后, P素的移动规律, 认为P素大部分还是通过地表径流作水平运动, 在土壤剖面的垂直运动相当缓慢, 极其有限^[5]。同时研究还确定了土壤P饱和度可以较好地指示地表径流中P素含量^[6]; 也确定了土壤载畜量与土壤有效P含量之间的关系, 确定了载畜量达P素平衡时的土壤有效P的临界值。

实施项目也提出了减少 N 和 P 使用的目标, 也提出了一些生态环境指标所要达到的要求, 即每年全国 N 输入与输出差总量达到 9 万 t 以下, P 输入与输出差总量达到 1 万 t 以下; 全国氨挥发从 1990 年的 5.45 万 t 降低到 4.78 万 t, 在农区饮用井水中硝酸盐的含量要低于 40 mg/L, 湖水中 P 含量要低于 0.03 mg/L。

6 农业生态环境措施

早期在“技术措施”阶段, 就实施了对湖泊进行人工增氧的措施, 在湖泊内安装通风系统增氧, 但效果不理想^[7]。后来, 采取了农学措施, 项目实施过程中很多的条款规定得相当细致。各地区可能有一些不一样, 但有几项是共同的, 包括: 在农场内土壤养分的输入必须低于作物需求量的 110%, 由州里的农业部门进行各项测定, 最终确定农场内需要输入土壤的养分量, 至于农场内多余的动物废弃物, 农户必须与政府签订合同, 调整给其他需要的农户; 政府部门定期进行土壤分析, 随时调整养分输入输出的平衡量; 农场的一部分土地 (7%) 必须保持休闲和不施任何肥料;

一个农场内必须要保持生长 4 种作物以上; 冬季土壤表面不能裸露; 农药和除草剂必须按指定的方式使用。在一些州还有其他一些更具体的措施, 如在 Lucerne 州^[1], 还规定参加项目实施的农户必须在水系旁边建立 5 m 宽的缓冲带, 坡度 18% 以上的坡地玉米必须免耕直播种植, 在平地上进行免耕条播。玉米、甜菜、土豆等作物的种植面积不得超过农场总面积的 20%, 必须改进农场的排水系统, 将农场废水排水系统与地表降水排水系统分离; 农户要定期接受培训; 在农场内建立磷的滞留池塘 (图 5); 根据实际情况相应减少猪和禽类的存栏数; 有些地方还开发和使用了低 P 猪饲料。这些措施取得了较好的成效。

所有这些细致的条款, 都规定了补偿价格, 农户可以执行全部条款, 获得政府给予全额补偿, 也可以执行部分条款而获得部分补偿。20 世纪 90 年代以来, 由于项目参与农户和执行条款的不断扩大, 生态补偿占农民收入的比例越来越高, 由 1990—1992 年的 30% 左右, 增加到 75% 左右, 超过了农民的农产品销售收入。



图 5 瑞士 Lucerne 州实施的各种生态农业措施

Fig. 5 Ecological agricultural measures conducted in Lucerne Kanton, Switzerland

7 生态农业措施获得的效果

经过多年的不懈努力, 终于取得了良好的效果。据统计, 每年全国 N 在农田系统的输入与输出差总量虽没有达到 9 万 t 以下, 但已降至 10~12 万 t, 而 P 输入与输出差总量达到 1 万 t 以下的目标已经完全

达到, 2000 年仅为 0.5 万 t (图 6)。

另一方面, 全国化肥用量也明显下降 (图 7), 尤其是 P 肥, 在 2000 年时, 用量仅为 5 万 t, 与 19 世纪 30—40 年代的时候差不多了。结合 N、P 每年输入输出差减少的事实, 从另一方面也使农民们认识到了, 动

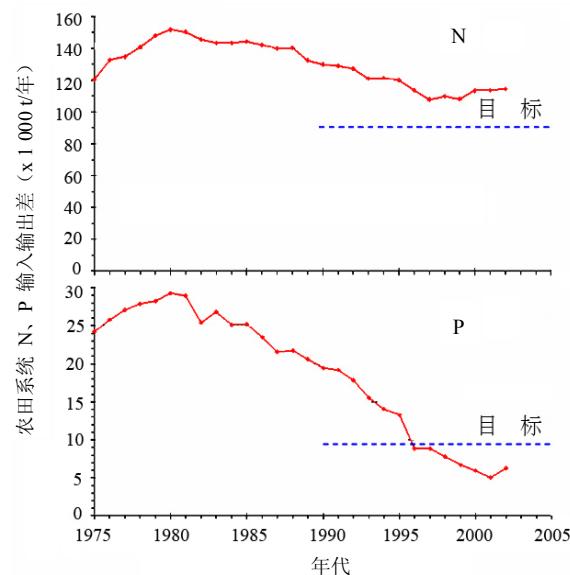


图 6 瑞士全国 N、P 输入与输出差总量演变

Fig. 6 Reduction of the national input/output N and P balance over years in Switzerland

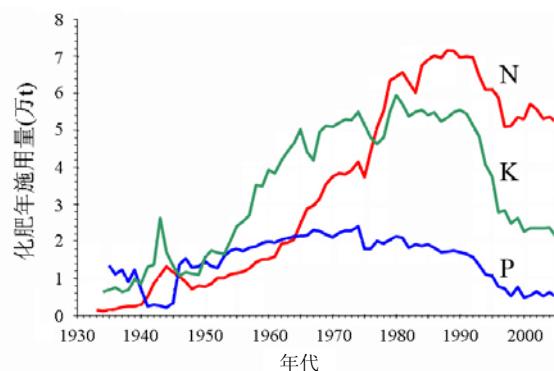


图 7 瑞士全国化肥施用总量演变

Fig. 7 Changes of use amounts of mineral fertilizers over years in Switzerland

物肥料是环境中 N、P 磷的一个重要来源。这些农业生态环境措施的实施改变了人们的观念, 使农场经营

者越来越多地加入到项目实施中来, 目前全国约 95% 以上的农民都自愿加入到项目中来了。与此相对应, 一些生态环境得到了明显恢复, 农业氨挥发的控制指标达到预定目标, 平均降至 4.55 万 t; 90% 的农区饮用井水的硝酸盐含量低于 40 mg/L; 湖水 P 含量均低于 0.03 mg/L, 达到了预期目标。

仔细分析湖水中 P 含量的演变过程可以发现 (图 8), 在 20 世纪 50—60 年代, 湖水中 P 含量已经相当的高了, 据当地的专家介绍, 这主要是由于这个时期的工业化和城市发展造成的^[8]。自从 1975 年开始认识到环境问题, 并开始着手治理, 直至 2005 年达到目标, 经历了大约 40 年时间。其中在 20 世纪 70 年代后期的雨污分流工程实施后, 湖水中 P 含量经过了一个短暂的下降, 然后, 由于农业的大发展, 湖水 P 含量又继续上升, 至 1975 年达到高峰, 之后, 在确定了环境中 N、P 来源的重要性和危害性后, 采取了以上的生态农业措施, 才使湖水中的 P 含量降到了目标水平: 30 mg/m³ (即 0.03 mg/L), 这个水平相当于瑞士工业化以前的水平。

8 瑞士生态农业措施对我们的启示

我国自 20 世纪 80 年代开始经济起飞, 由于原先经济较为落后, 发展迟于西方发达国家, 所以, 从一开始, 经济发展就显示出十分强劲的势头, 工业、农业、城市建设齐头并进, 这不可避免地造成环境的沉重负担, 这一点不同于瑞士的发展道路。他们在发展过程中明显经历了早期的工业化和城市化的发展阶段, 之后则经历了一个农业发展的高峰, 所以, 治理是分阶段进行的, 包括 20 世纪 60 年代实施的雨污分流、80 年代实施的含 P 洗衣粉禁用, 然后在 70 年代后期实施的生态农业措施等 (图 9)。而我们在环境治

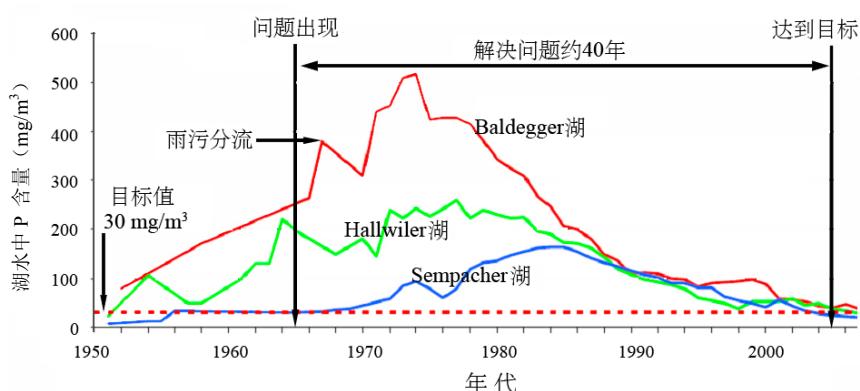


图 8 瑞士 Lucerne 州主要湖水中 P 含量的历史演变

Fig. 8 Changes of P concentrations in the water of lakes over years in Lucerne Kanton, Switzerland

理上，不可能这么按部就班，也应该像搞经济建设一样，多头并进。自从前几年太湖和滇池地区出现蓝藻爆发的生态事故后，政府已经开始着力治理，但治理的主要对象是污染企业的关停并转。近年来，已经开始在城市地区实施雨污分流工程。这些无疑对环境的改善起到积极的作用。

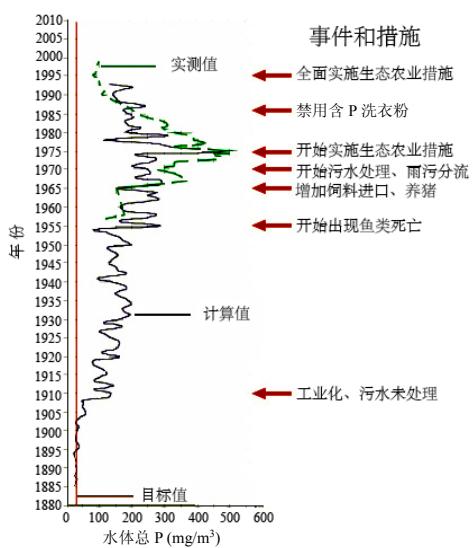


图 9 瑞士典型湖泊水体 P 含量、富集原因及控制措施演变

Fig. 9 Histories of P concentrations in the water of selected lakes, driving events, and remediation measures

相对而言，我国对农业污染源的治理还是滞后，尽管政府也在支持和提倡控制农业面源污染，一些研究项目也在致力于这方面的研究工作，但真正实质性的工作并不多，研究也只是限于试验示范，农业面源污染的主体，农民并没有参与进来。我觉得主要有两方面的原因：①目前还仍然有不少人认为，农业面源污染在我国还是一个主要问题；②从瑞士生态农业措施的实施过程看，这是一个漫长的过程，其效果也要多少年后才会显现，这与目前人们普遍的浮躁心态相矛盾，因此很难引起政府以致大众的兴趣。所以，要从农业管理措施上来改善生态环境，必须要克服这两种心态，否则，还是流于表面，起不到实质的效果。

至于如何实施生态农业的管理措施，则视具体情况，确定相应的措施，但上述经验也不无借鉴之处。例如，奖励政策以实际的措施挂钩，在经济发达地区，我觉得也可以采用农田养分平衡的管理方法，当然，这项措施可能会降低一定的产量，但是，目前在长江中下游的大部分农民在农业生产中，产量已经不是他们关注的重点，如果牺牲一点产量能得到一定的补助，

应该是可行的；同时，农业部门的测土配方施肥工作与这些措施结合起来，从机制上也是完全行得通的。对于养分高投入高产出的设施农业，完全可以采取生态缓冲带、生态滞留池、变换不同的作物种类等措施，将生产中多余的养分控制在一定区域内，不要让其进入河流、湖泊等大环境中，这些措施实际上已经在一些集约化设施园区内开展，也可以通过补偿的办法让更多的生产者参与。

总之，只要齐头并进，改变观念，克服浮躁情绪，采取适合富营养化地区的生态农业措施，稳扎稳打的推进环境治理，那么，青山绿水、和谐美好的环境一定会再次呈现在我们的面前。

致谢：感谢瑞典 Lucerne 州环境、经济、农业和林业局的 Franz Stadelmann 博士，苏黎世瑞士联邦工学院水科学研究所的 Christian Stamm 博士，苏黎世瑞士联邦工学院植物营养课题组的 Else Bünnemann 博士、Astrid Oberson 博士、Frank Liebisch 博士生。感谢他们热情的接待、友好的交谈，并提供了富有价值的资料。

参考文献：

- [1] Stadelmann P, Lovas R, Butcher E. 20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern, Band 37, 2002
- [2] Hofer F. Strukturwirkung von Direktzahlungen (Doctoral thesis, Agricultural Economics). Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2002
- [3] Gächter R, Furrer OJ. Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz (The contribution of agriculture to the eutrophication of waters in Switzerland). Schweiz. Z. Hydrol. 1972, 34: 41–70
- [4] Oberson A, Nanzer S, Bosshard C, Dubois D, Mäder P, Frossard E. Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance. Plant and Soil, 2007, 290: 69–83
- [5] Stamm C, Flühler H, Gächter R, Leuenberger J, Wunderli H. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. Journal Environmental Quality, 1998, 27: 515–522
- [6] Schärer M, Stamm C, Vollmer T, Frossard E, Oberson A, Flühler H, Sinaj S. Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. Soil Use and Management, 2007, 23: 154–164
- [7] Gächter R, Whehrli B. Ten years of artificial mixing and oxygenation: No effect on the internal phosphorus loading of two

eutrophic lakes. Environmental Science and Technology, 1998, 32: 3659-3665 [8] Herzog P. Sanierung des Baldeggsees Auswertung der Zufluss-Untersuchungen 2000 bis 2004. Kanton Luzern, 2005

Introduction on Remediation and Its Effects of Water Eutrophication Through Ecologically Agricultural Measures in Switzerland

HUANG Biao¹, EMMANUEL Frossard², SUN Wei-xia¹, HU Wen-you¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation of Chinese Academy of Sciences, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Lindau CH-8315, Switzerland)

Abstract: This paper introduced the experiences of water eutrophication remediation through ecologically agricultural measures in Switzerland since 1960s, including government policy-making, basic research, remediation methods, and remediation effects. Finally, some ideas on water environmental remediation in China were given.

Key words: Water eutrophication, Policies, Basic research, Measurements, Switzerland