



李百炼,美国加利福尼亚大学终身教授,美国科学促进会会士,美国人类生态科学院院士,俄罗斯科学院外籍院士,世界生态高峰论坛(EcoSummit)主席,2015 普利高津金奖获得者。研究方向为理论生态学和生态复杂性建模。

谈“十四五”生态保护与绿色发展的生态关系

李百炼¹,伍业钢²

1. 美国加利福尼亚大学(河滨)生态复杂性及其建模实验室,河滨 92521-0124
2. 北京博大生态城市规划设计院,北京 100105

摘要 从“十四五”保护与发展的生态关系角度,探讨了生态保护与绿色发展的十大生态关系,阐述了生态保护和绿色发展中的一系列有关生态关系的生态智慧及生态技术,并对长江、黄河等流域的生态保护和修复提出了相关建议。

关键词 生态;生态经济;生态智慧;生态技术;生态城市

“十四五”时期的生态与环境保护,提出以2035年基本建成美丽中国的目标为指引,做长短板、补足短板、以点带面,全面开展目标设定、措施部署工作。具体来说,一是要将各行政区域生态保护和绿色发展融入流域、区域的生态环保和绿色发展大格局,即基于长江、黄河流域生态大保护和绿色发展的基础上,增加对淮河、海河、松花江、辽河

等大流域、渤海湾等大海域的流域生态系统修复。二是以武汉、成都、长沙、西安等为中心城市的大都市群,在长三角、珠三角、汾渭平原等区域,全面开展流域和区域生态保护与绿色发展工作,将各行政区域与流域和区域的大格局的生态保护和绿色发展结合起来,整体提升中国生态保护和绿色发展质量。要实现这两大目标,处理好各种生态关系至关

收稿日期:2021-01-27;修回日期:2021-02-06

引用格式:李百炼,伍业钢.谈“十四五”生态保护与绿色发展的生态关系[J].科技导报,2021,39(3):88-101;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.03.007

重要。

生态学也可以称之为“生态关系学”。生态不等同于自然,生态也不等同于环境,但生态包含自然与环境。环境可以包括自然环境和社会环境。所以,生态学也是研究自然、自然环境与社会环境相互作用和相互关系的科学。生态学有三大要素:生态承载力(例如,草场承载力、城市承载力、生态系统承载力,等)、生态关系(例如,草场与羊群的关系、城市空间格局与交通的关系、生态系统结构与功能的关系,等)、生态可持续性(例如,草场、城市、生态系统在不突破生态承载力的条件下,都有一定的生态可塑性或韧性,都可以保持生态可持续性)。生态承载力强调生态系统的限制性和不可逾越性;生态可持续性是指生态系统的生态可塑性或韧性和自然属性;生态关系则是保护和发展的关键,是生态可持续的关键,是生态学的全部意义所在。

生态不仅是保护的概念,也是发展的概念。生态保护与绿色发展的生态关系的根本在于其是“一枚硬币的两面”,是相辅相成的关系。对于生态关系的论述,将着重探讨生态保护与绿色发展的十大生态关系。当然,在阐述处理好这十大生态关系的同时,也自然包含生态保护和绿色发展处理一系列生态关系的生态智慧及生态技术。

1 在不同生态尺度和不同生态等级上的生态关系

生态学尺度的含义不是空间范围或面积大小的问题,它是一个生态等级的概念^[1-2]。生态修复和生态保护是在什么空间尺度上产生的问题,也只能在所特定空间的尺度上解决问题。例如,从城市小区的尺度,需要做好海绵建设,雨水就地下渗、减少地表径流。而在城市区域的尺度上,为了避免“城市看海”,就应该把城市建设在安全高程之上,避免占用水面,应该“围城”而不“围水”。从流域的尺度,应该保护水系的自然水文形态、河流的弯曲度以及河漫滩和湿地,更重要的是要保护水系水岸植被,需要加大力度恢复城市区域的湿地和水面的面积^[3]。

那么,在流域的尺度上产生的问题,也只能在区域或流域的尺度上解决问题。这是生态学的基本常识,即一切生态关系是以生态尺度为基础的生态系统关系。如果某一生态尺度上的生态系统的各种生态关系突破了生态承载力,系统就会崩溃,也就不可持续。而维持和理解生态承载力的关键就是理解和协调好生态系统内部和外部的各种生态关系,包括:功能、结构、过程、动态、空间、时间和尺度的相互交错的复合和复杂关系。

从流域尺度考虑“城市看海”的问题首先需要关注流域里的河流比降,也即河流水面比降,又称水力坡度。从理论上说河流水面比降受水流速、河床、水质等诸多因素的影响。但从实用的角度出发,要注意几个基本的数字:

1) 比降 $<0.004\%$ (万分之零点四),水面是一个静止的状态,这么小的坡度,由于水表张力的作用,水体无法流动。另外一层意思是,如果从三峡大坝到重庆朝天门码头约600 km,三峡大坝的水位为145 m高程,即使没有水的流动,重庆的水位也会在169 m高程以上。

2) $0.004\% <$ 比降 $<0.01\%$ (万分之一),则会产生泥沙沉淀,堵塞河道,形成死水。

3) $0.01\% <$ 比降 $<0.1\%$ (千分之一),这是水体自净化能力最强的水流。河流为什么是弯弯曲曲的?为什么会有河漫滩?就是河流要自我实现这一动态稳定的坡降比,是河流可持续的自然规律。

4) 比降 $>0.1\%$,水流顺畅,但自净化功能降低,冲刷增加,水资源也就快速流失。比降大时,河流就会冲刷拐弯,加大长度,减少比降,直到达到平衡。洪水来时,水头压力加大,比降也会加大。水流尤其是洪水,受到大坝的阻拦,就会增加水头的压力,比降就会抬高。即使只抬高到0.1%,当三峡大坝处于145 m的水位时,重庆的水位也可能会达到195~205 m(重庆“看海”的水位)。这是从流域的尺度理解“城市看海”的第一个基本常识。

根据气象资料我们发现,近25年全国各城市的年平均降雨量与前25年并没有太大的差别。但是,一次连续降雨量能占据年平均降雨量的30%~70%,甚至达到年平均降雨量的120%。例如,根据

国家气象科学数据中心的数据,河北省赞皇县历史上年均降雨量 568 mm,而 2016 年 7 月 19 日一次连续降雨量高达 721 mm,超过年均降雨量 26.9%。2020 年梅雨期,降雨强度大、时间长,有的突破历史极值。据统计:2020 年 6 月 8 日入梅以来,截至 7 月 19 日,武汉市梅雨期已历时 42 天,与 1998 年梅雨期时长持平,时长历史第 2。共经历 8 轮强降雨,累计降水量达到 801.1 ~ 1046.9 mm,局部地区超过 1100 mm,全市平均累计降水量 883.1 mm,接近 2016 年历史同期平均累计雨量(923 mm),居历史同期第 2 位;其中江夏乌龙泉最大累计雨量为 1122 mm,最大 24 h 降雨量 472.3 mm,为历史极值。这意味着突发性和多发性的连续强降雨是必须面对的现实。也就是说,“城市看海”的强度和频度都会突破我们的想象。

另一现实是,整个流域同时产生突发性和多发性连续强降雨的可能性越来越大。这种高强度的连续降雨和全流域的高强度降雨是前所未有的挑战。我们习惯了筑高坝来抵御“百年一遇”“千年一遇”的洪水的防洪方式,通过河道取直、围湖造城等方式,千方百计把洪水给“束缚”起来。可是,我们所面临的是作用力与反作用力的风险。这些风险,有可能“千年一遇”,也可能明天就会降临。除此之外,还有大面积洪水被“束缚”无处可去而返回“原住地”的风险。总之,我们为防洪所做的很多努力,不但没有成效,反而得到了残酷的“回报”。

介绍一下我们在美国迈阿密大都市观察到的一个有趣现象。迈阿密是近 60 年来在海岸湿地上发展起来的。整座城市水网交错,看不到防洪堤坝,房屋临水而居,高出水面(即海平面)不到 3 m。这里的年降雨量超过 1800 mm,一次连续降雨量(包括台风雨)可超过 300 mm,却无“城市看海”现象的发生,其中的原因值得探究。根据我们在卫星图片上的测量,这座大都市水面面积与陆地面积之比超过 20%。也就是说,如果一次 300 mm 的连续降雨量倾泄到 100 km² 的汇水面积上(不考虑下渗和其他因素),300 mm 的雨水从 100 km² 汇集到 20 km² 的水面上,水面上的水位会升高 5 倍,即 1.5 m。这当然过于简单。但是这个案例却提醒我们,

在流域的水平上,水面面积的大小和多少关系重大。网络上有很多关于迈阿密 2050 年“城市看海”的预言,但预言的背景是全球气候变暖的问题,是全球尺度上“城市看海”的问题,不在本文讨论的范围之内。

在对于水面面积与陆地面积之比的研究中,我们还发现,田纳西州作为美国最早成立流域管理局的区域,其水面面积与陆地面积之比是 7%~11%。而中国许多省份的水面面积与陆地面积之比都在 1% 以下,这是国家“绿水青山”建设和生态文明建设亟需关注的问题^[4]。这也自然地引出一个问题,为什么如今“四城三山二水一分田”的武汉,即使还有 20% 的水面,却总还面临着“城市看海”的难题?从武汉历代水系的湖泊和湿地分布面积不断缩减,从唐宋时期到 21 世纪武汉湖泊湿地的变迁,我们可以看出水系湖泊湿地的消失、相连水系被城市空间的阻隔、长江堤坝等水系空间格局的变迁^[5],更是造成今天武汉“城市看海”的重要原因。

2 生态系统的空间生态关系——空间格局

空间格局也即景观格局。它是空间斑块、斑块大小、斑块边界、斑块距离的生态关系。空间格局是景观生态学的三大重要概念(空间格局、时空尺度、斑块动态)之一。景观生态学也称为空间生态学、国土空间生态学、空间生态系统生态学,简言之,生态系统加上空间维度就是景观生态学。景观生态学是应用性很强的生态学学科,景观是特指有一定空间面积和边界的生态系统。空间大小构成不同的空间尺度(例如上文阐述的社区尺度、城市尺度、流域尺度、全球尺度)。从技术层面上讲,景观生态学研究要求参照该空间生态系统的历史和发展的变化,这就是空间动态(斑块动态)。而这种空间动态在不同空间尺度上也相对应于不同时间尺度(例如,湿地景观斑块动态可能是以年来表示的,而流域植被景观斑块动态可能是以世纪来表示),空间尺度和时间尺度的统一,统称为时空尺度^[2,6]。

另外,景观生态系统和景观空间格局在不同的

生态尺度,都具有不同的斑块镶嵌格局和生态廊道。按照景观生态学的术语,斑块是指某一种景观内部较为一致,具有一定的空间面积和形状,有明显的边界。廊道是指相对于某一种野生动物生境景观而言的、链接两块生境斑块的最小安全生境过道。另外一个景观生态学的术语是基质,指景观元素,例如森林景观、植被景观、农田景观等。斑块、廊道、基质构成景观生态系统的空间格局。格局指空间相互关系,是二维或三维的,再加上时间,就是四维的。格局也是景观的空间生态关系。例如,高个、矮个、胖人、瘦人,相当于景观生态系统空间格局和空间生态关系的概念;它相对于男人、女人、不同肤色的人,是人类生态系统生态关系的概念。这些定义的特定对象、场景、语意,对于国土空间规划非常重要。

对于恢复水系生态系统和自然景观空间格局的湿地设计,我们使用了 Lacunarity 空间格局指数^[7]来模拟自然景观空间格局,例如等式(1):

$$\lambda(r) = \sum S^2 Q(S,r) / \left[\sum SQ(S,r) \right]^2 \quad (1)$$

式中, $\lambda(r)$ 是 Lacunarity 空间格局指数(也称“景观破碎指数”或“景观空洞指数”)($r=2,4,16,\dots$)是横跨景观的景观滑行框的大小(滑行框含景观总像元数多少:2,4,16, \dots); S 是滑行框内给定景观类型的像元数; $Q(S,r)$ 是在景观滑行框中给定景观类型的对应频率发生。

天然湿地的 Lacunarity 空间格局指数 $\lambda(r)$,在 1.75~4.85 间变化^[7]。应用天然湿地的 Lacunarity 空间格局指数 $\lambda(r)$,使景观的自然空间可量化、可对比、可复制,且可设计。它也可作为模仿不同时空尺度下自然景观的空间格局指标。该指数可以帮助理解为什么我们的设计必须效法自然景观空间格局,以及如何效法自然景观空间格局进行设计,即如何通过生态修复和生态工程恢复景观的自然空间格局。

3 绿色发展与生态系统的时空相互依存之生态关系——生态经济

生态经济学是跨学科和交叉学科的学术研究

领域,致力于解决人类经济与自然生态系统在时间和空间上的相互依存和共同发展的生态关系。可持续发展就是通过将经济视为地球上更大的生态系统的子系统,并强调保护自然资本和社会经济资本的可持续性,使得人类在时间和空间上可持续发展。生态经济学的领域与环境经济学有所区别,生态经济学和环境经济学是不同的经济学思想流派。环境经济学是对环境资产利用的经济学分析,以及对环境资产利用的最优化研究。生态经济学家则强调经济的可持续性,强调在考虑经济成本和社会成本的同时,将生态成本也考虑进去;并主张人类社会的物质资本对自然资本的不可代替性^[8]。

传统经济学以自然资源无限供给作为条件,自然资本的稀缺性将直接影响一个地区的经济产出,如中国越来越多的沿海地区,由于土地、能源和水资源供应不足,制约了当地经济的发展。增加资源的数量和质量,就会增加社会总产出。生态文明建设中的一个难点,是如何实现经济增长和环境保护协同推进。自然资本的提出,对于解决这个难点提供了一个好的解决方案。未来中国无疑需要继续发展,而前提是仍然需要有足够的投资。投资自然是寻找新的有可持续发展意义的投资领域,符合中国转型发展的方向。自然资本的投入与生态补偿、绿色 GDP、生态系统服务价值有关。

1) 生态补偿。生态补偿是由于行为主体的经济活动,提高或降低了生态系统服务功能,对其他利益相关者产生影响,从而在利益相关者之间进行利益调整的一种方式,包括受损者和保护建设者接受补偿、损害者和受益者提供补偿。要实施真正的生态保护,我们亟需采取生态补偿措施。随着经济社会快速发展,一些地区水资源过度开发利用、水质污染、河湖萎缩、地下水超采、水土流失等问题突出,部分地区生态环境脆弱,保护者和受益者之间的利益关系脱节,应用金融工具,建立水生态保护补偿机制,有助中国河湖永续利用。

国内外学者们从不同的角度和不同的侧重点对生态补偿的涵义进行了探讨。李文华^[9]认为,生态补偿是以保护和可持续利用生态系统服务为目

的,以经济手段为主调节相关者利益关系的制度安排。广义的生态补偿应该包括环境污染和生态服务功能两个方面的内容,也就是说不仅包括由生态系统服务受益者向生态系统服务提供者提供因保护生态环境所造成损失的补偿,还包括由环境破坏者向环境破坏受害者的赔偿。

2) 绿色GDP。绿色GDP是指一个国家或地区在考虑了自然资源(主要包括土地、森林、矿产、水和海洋)与环境因素(包括生物环境、自然环境、人文环境等)影响之后经济活动的最终成果,即将经济活动中所付出的资源耗减成本和环境降级成本从GDP中予以扣除。改革现行的国民经济核算体系,对环境资源进行核算,从现行GDP中扣除环境资源成本和对环境资源的保护服务费用,其计算结果可称为“绿色GDP”。绿色GDP这个指标,实质上代表了国民经济增长的净正效应。绿色GDP占GDP的比重越高,表明国民经济增长的正面效应越高,负面效应越低,反之亦然^[6]。

以前仅通过GDP来看一个国家的繁荣,它的确需要经济支撑,但是并不意味着GDP能够实现这个国家的整体发展。例如,自1950年联合国开始收集GDP数据以来,GDP一直在增长。但是人类社会幸福进步的发展指数到20世纪70年代就到了上限,甚至之后有些下降。过去几十年全球尺度的发展,经济的确是增长的,因为GDP是衡量经济活动的一个指数,但是并没有带来整个社会的繁荣。Bensel and Turk^[10]从1950—2000年全球人均GDP和人类福祉指数(GPI)的比较研究表明,全球人均GDP从1950年一直在增长,但是幸福指数(GPI)基本平缓不变。人类社会的繁荣昌盛不是简单的经济增长,还包括整个生态系统的健康与可持续,生态保护可以带来的生态效益、经济效益和社会效益的统一^[3]。

3) 生态系统服务价值。生态经济学家一致认为,生态系统会为人类带来大量的商品和服务,在人类福祉中发挥关键作用。但是,如何为生态系统服务赋予价值的争论也很激烈。Costanza及其同事^[11]进行了一项研究,来确定生态系统所提供服务的“价值”。通过在非常特定的背景(环境条件、社

会条件、经济条件)下进行一系列研究得出平均值。然而,这一平均值并没有考虑不同背景。对于不同类型的生态系统,例如,湿地、森林、海洋等,地球全部生态系统的生态系统服务总价值为33万亿美元(1997年),这一价值是当时世界总GDP的2倍以上。这项研究遭到了一些传统生态经济学家和环境经济学家的批评,因为这一生态系统服务价值评估与金融资本估值的假设不一致,不可能有共同认可的价值。例如对一块石头的认知,假设它是一种珍贵的矿石和假设它是一块建筑的石料;不一致的假设(认知)的估值,没有可比性和一致性。再如,一棵树不能以燃烧能量来估算它的价值,它有吸收碳、净化空气、美化环境的作用,是森林生态系统服务的一分子,即生态系统服务价值具有不可比性。

生态系统服务价值的另一个争议是,不能将生态系统视为按货币价值进行评估的商品和服务。因为生命是宝贵的或无价的,但是在成本效益分析和其他标准的经济估值中,生命显然变得毫无价值。降低人的财务价值是主流经济学的必要组成部分,往往通过保险或工资来实现。经济学原则上认为,通过自愿合同关系和价格(保险和工资)达成协议来获取他人提供商品或服务,是服务价值的体现。在这一点上,生态系统在经济价值上所提供服务或商品没有什么不同,只不过生态系统服务的可替代性远低于典型的劳动力或商品。同样的价格,可能可以在市场上找到相似的劳动力服务,但是,往往许多生态系统服务是唯一的,即是生态系统服务的不可替代性。只有在充分认识到生态系统的自然属性和它的整体性与完整性的前提下,生态系统服务和生态产品价值的评估才有意义,这样的价值转化才可能持续,否则这类评估只是一个简单、线性的算术游戏,没有任何实际意义。

4 绿水青山的国家发展战略与生态保护的关系

“绿水青山就是金山银山”作为国家未来30年可持续发展战略,它不是一个权宜之计,也不仅是一个保护的概念,它是一个发展的概念,是一个可

持续经济发展的概念。中国从“发展是硬道理”这个阶段走过了40年,现在要有一个新的发展模式、新的经济模式、新的生活模式以及新的经济增长模式。这个模式就是“绿水青山”模式、绿色发展模式、生态发展模式、生态+模式。这个发展模式是中国发展的2.0,是一个新的台阶、新的版本。

推动“绿水青山就是金山银山”的国家发展战略,需要有一个更高层次的顶层设计。就是说,从“十四五”到2035年,再到2049年,在中华人民共和国成立100周年的时候,国家的发展会是一种什么样的蓝图?显然,这个发展蓝图必须建立在尊重自然、顺应自然、保护自然,同时追求经济繁荣、社会公平、人与自然和谐的生态安全基础上的。要实现“绿水青山”,就要首先解决我们面临的一系列生态环境问题,要改变现有的经济体系,改变传统的“为经济而经济”的生产方式和产业模式。人类的资本包括3种:一是经济资本,二是社会政治资本,三是自然和/或环境资本。只有把这3种资本协调统一,人类发展的整体才能真正达到高水平。我们要重现社会资本,修复自然资本,从而拓展生态系统的承载力,才能做大经济资本,使得生态系统服务价值和功能不断升值。从复杂生态系统的科学分析入手,优化应用法律、政策、金融、生态工程与修复技术等形成完善的产业生态化、生态产业化链,赋能生态价值,从而促进国家发展在生态、社会、经济等方面的全方位振兴和复兴。

5 处理各种生态关系的生态技术

不同的生态系统内生态关系极其复杂,生态关系的复杂性又决定了生态保护和生态修复中生态技术的复杂性^[2,12]。我们着重讨论流域水系(河流、湿地)生态保护和生态修复的六大生态技术。

湿地生态修复的过程中,要实现尊重自然法则、重塑景观格局及恢复生态系统的结构和功能的基本原则,目标是提高湿地生态系统的自我修复和自我净化能力。这就需要通过一系列生态技术,尽量减少人为工程干扰因素。首先,要保证湿地作为水资源保护、储存雨洪资源、生物多样性生境、景观格

局多样性、城市防洪安全(即保障湿地周边建设区的防洪安全以及湿地生态系统的排涝安全)等复杂的、相互交错的生态系统功能和结构得以修复。其次,根据湖底、河床、湿地的坡降比,改造其微地形,打造坑塘岛屿系统和锅底型地形,保证万分之一至千分之一的坡降比,恢复水生态系统自净化的水动力,恢复湿地的自然空间格局;并根据最大连续降雨量,设定安全高程设计陆地的建设区和非建设区,保证城市建设永远免遭洪水危害。

湿地生态系统要实现可持续发展,就必须拥有高效、完善以及可持续的自我修复和自我净化能力。为实现这一目标,我们在进行湿地建设过程中选择了六大生态技术^[13]:

1) 河床空间改造。

为什么自然河流是弯弯曲曲的?自然弯曲的河流保留了河漫滩、水流弯曲度、湿地、坑塘岛屿系统、河岸植被,以及不同水深。这些都是河流生态系统保持自然水动力、自然净化能力、水资源和水质、水生境和水生态系统的重要因素。当自然河床被改造成硬堤岸,去弯取直,河漫滩就会消失,河床变水渠。对于已经取直的人工河道,必须效法自然,通过河床三维空间的改造,修复河流生态系统保持自然水动力、自然净化能力、水资源和水质。

首先,应该在河床里打造多坑塘、岛屿、水漫滩交替格局,为耐湿植物、沉水植物、挺水植物、浮水植物、漂浮植物全面打造适宜生境,使富营养化水体得到反复沉淀和吸收净化,提高水系自净化能力,提高水质净化的效率。同时,多坑塘岛屿系统打造可以使地表径流污染物的净化效率得到最大程度的发挥。根据汇水量、削减的目标等综合考虑打造多坑塘岛屿系统,利用坑塘水深的不同、滞留时间的不同、与不同地形地势上的过水植被充分吸附与拦截才能保持自然多坑塘岛屿系统的稳定与自我修复能力,最大程度地发挥多坑塘岛屿系统对于区域内的雨洪调蓄、地表径流污染截留与净化、吸附和降解等方面的生态功能的修复,促进生态系统的生态循环,降低水域的污染风险。

2) 三道防线。

三道防线是通过林地、草沟、护坡三道防线,层

层过滤,将地表污染物沉淀、吸收、净化,保证进入河道、湖泊的雨水水质达到安全标准,并且扩大径流的表面积,避免地面径流冲刷堤岸,造成水土流失。海湾湿地的“三道防线”,可对入湾区雨水进行有效过滤净化,能够削减60%~80%地表径流的面源污染。

水系岸边的三道防线对水体起到不可缺失的保护作用。为解决面源污染,应建立起阻断污染的“林地、草沟、护坡”三道生态防线,避免面源污染直接进入水体。一方面,三道防线构成了水生态系统中生物生境的天然屏障;另一方面,水陆植被交错带是生物多样性和生境多样性的重要地带,构建较为完整的三道防线能有效消减地表径流带来的面源污染。

3) 湿地植被系统。

“林地、草沟、护坡”三道生态防线之后,湿地生态系统是构成水系水质安全的主要部分。湿地植物是湿地生态系统组成的重要一环。湿地植物种类繁多,主要包括水生、沼生、盐生以及一些中生的草本植物。湿地植物在湿地生境的进化过程中,经历了由沉水植物-浮叶植物-浮水植物-湿生(挺水)植物-陆生植物的进化演变过程,而其演变过程与湖泊水体沼泽化进程相吻合。

湿地植物配置和生态修复需要始终处理好自净化系统和污染消减的生态关系以及四大要素。通过模拟地形、地貌、水文、生境、植物群落、景观多样性,构建人与自然和谐系统,依靠自然、人工促进的生态修复过程,建立生态自净化系统、河流生态系统和生物多样性系统,依靠水动力、土壤、植物、微生物等四大核心要素,最大限度削减污染,促进生态红利的最大化。

4) 跌水堰曝气富氧。

水体缺氧是河道、湖泊黑臭的根本原因,选择适当的曝气系统是城市黑臭河、湖生态修复的重要技术环节。水体中的溶解氧主要来源于大气复氧和水生植物的光合作用,单靠自然复氧,水体自净化过程非常缓慢,对河、湖进行曝气充氧以提高溶解氧水平,恢复和增强水体中好氧微生物的活力,从而改善水体水质。曝气在湿地设计上起着非常

重要的作用,主要体现在以下4个层面:(1)水动力层面,加速水体中氧的交换;(2)微生物层面,有利于微生物的快速繁殖;(3)植物层面,为水生植物的生长提供充足的氧;(4)景观层面,具有良好的景观效果和趣味性。

采用自然河流跌水堰曝气富氧是最佳生态修复的选择。跌水堰是模拟自然河道内的自然阻隔,使上游渠道(河、沟、水库、塘及排水区等)水流自由跌落到下游渠道的落差构筑物(主要为石头或岩石)。跌水堰多用于不同的落差,也常与水闸和溢流堰连接作为渠道上的退水及泄水建筑物。根据落差大小,跌水可做成单级或多级。跌水堰主要用石块,石块大小根据水流速度决定,水流越快需要的石块越大。也可以考虑采用混凝土等材料建筑,必要时某些部位的混凝土可配置少量钢筋或使用钢筋混凝土结构。沉淀和曝气是跌水堰的基本功能。

5) 原位微生物激活技术。

原位微生物激活技术属于微生物强化技术中的一种,可配合其他水生态修复技术使用。在自然水体中,微生物作为分解者,其数量和活性受水污染的影响而降低,也直接影响到对污染物的降解能力。原位激活技术是通过增添原位激活素来激活原位微生物,以修复微生物对污染物的降解能力。原位微生物是指生存在植物根圈范围中,对植物生长有促进或对病原菌有拮抗作用的有益细菌的统称。该技术的核心是把激活原位微生物所需的各种营养物质通过纳米技术及微包覆技术制成颗粒均匀的生态修复剂,加入特制生态反应池中,激活和繁殖原位微生物。

同时,利用缓释技术把这些营养物质持续提供给水环境中的原位微生物,这些原位微生物被连续不断的激活并不断被提供能量和营养而快速繁殖。不断繁殖的微生物将水体中的富营养物质(如氮、磷等)转化成可被浮游微生物及水体植物吸收的营养物质,浮游微生物及水体植物又被当做鱼、虾等生物的食物。从而形成“大鱼吃小鱼,小鱼吃虾米”的良性生物链,对水体进行原位生态修复。同时,一些高等生物如水草、鱼虾等的增多会进一步恢复

水域的自净能力,达到生态平衡,从而起到水体生态修复的作用。其反应机理主要包括:(1) PGPR (原位激活微生物)的激活;(2) 食物链的去氮去磷作用;(3) 生物清淤机理;(4) 细菌反硝化过程。

6) 水岸林生态系统保护。

水岸林一般以防护林和景观林为主,使得滨水空间成为适宜人类活动的休憩场所。但是,水岸林却是水系生态系统、水质水安全、生境不可缺失的陆地生态系统。水岸林一般被视作“生态风景林”,涵义是根据景观林建设的要求,也具有防护功能的林地功能。它一般包括3个方面内涵:生态系统、视觉景观与林地。但是,更为重要的是,应该从景观生态学角度,将水岸林视作生态廊道景观,其往往形成沿河流布局的廊道绿带。它具备5种基本功能:提供栖息地(habitat)、提供通道(conduit)、过滤(filter)、供给源(source)以及汇(sink)。

自然水岸林生态系统处于水生生态系统与高地生态系统之间,水岸林是水岸生态系统中向高低生态系统过度缓冲的部分,包含高低生态系统临近水岸的林地以及沿水岸种植的林地,也具有5种基础功能:栖息地功能、通道功能、过滤功能、调蓄功能以及动态平衡功能。

6 处理生态关系和生态保护的天然法则

师法自然的生态保护和生态修复理念是基于生态学的基本原则。“师法自然的生态修复法”^[12,14]即模拟自然,尤其是地形、地貌、水文、生态等,构建人与自然和谐、依靠自然、人工促进的生态修复过程;以工程技术还原自然生态系统,以模型量化优化工程措施,实现生态治理的系统性、完整性、自然性与可持续性。例如湿地生态系统在其千百年的自然演化过程中,它的空间格局、水动力、水深变化、水与植被的相互作用、水与土壤的相互作用、厌氧土壤与植被的相互作用、水岸的演替、湿地岛的演替与植被演替等,都存在着千丝万缕的生态关系。理解这些生态关系,就是对湿地生态系统和景观空间格局的理解,也是对湿地自然法则的理解。

可是,对这样一种动态的、复合或复杂生态系统关系的理解,以及如何应用于湿地生态保护和生态修复,对于湿地生态学家是极为困难的,因为我们对大自然的理解永远是那么的欠缺。因此,师法自然的理念成为生态修复的最安全、最可持续的原则。我们认为,生态修复应该遵循师法自然法则,关注、理解和模仿当地或者是区域内自然湿地的生态系统、空间格局、水动力、植被结构,也许是保证生态系统的生态可持续性最可靠的方法^[6]。

湿地建设已经是中国生态城市建设、生态文明建设、海绵城市建设以及水生态系统修复的重点和国家战略。湿地建设最大的挑战是恢复水质、水生生态系统和景观空间格局,这是湿地生态修复成功与否的关键。湿地并不是“水加草”,也不是“小于6 m水深的区域”。湿地的定义有3个标准,缺一不可:(1) 干湿交织的水环境;(2) 湿地植物(挺水植物和沉水植物)的生境;(3) 湿地厌氧土壤的形成。为了人类与自然和谐相处,生态修复应该面向未来、面向自然、面向可持续发展。当然,我们需要了解师法自然的生态修复理念是如何影响生态建设、生态系统恢复、资源保护、景观格局、生态城市建设、生态建筑和社会发展的,以及今后的生态保护和绿色发展的方向。

师法自然还可以帮助人类面对这些新的极端气候的挑战,帮助我们不断识别和应对所有这些极端条件的可能性及对当地影响最严重的程度。例如,湖北荆门,其年平均降水量为935 mm,而一次极端连续降水量却高达873.2 mm,约为年均降雨总量的93%;另一种极端天气状况则是,在极端干旱的季节,该区域的湖泊水位可下降6.37 m。为了应对这两种极端条件,我们充分利用原始的地形地貌,按照极端连续降水量873.2 mm的模拟容量,为荆门市爱飞客小镇设计了1278 hm²的湖泊面积(占总面积的48%)。同时,为了防止极端干旱的影响,设计了20%以上水深超过6.0 m的水面,保证在极端干旱的季节也保留一定的水面和水资源。这种成功提示我们,如今“天人合一”的生态原则是要接受由人类的影响所造成的“动荡”“不确定”“极端”变化的“天”对人类的挑战^[6]。

7 城市发展和生态城市建设的生态关系

作为生态学者,我们时刻都在拷问自己,什么是生态城市?为什么需要生态城市?如何建设生态城市(理念和技术)?生态城市的标准是什么?

生态城市无疑是生态可持续的城市。而城市的可持续建设就必然要充分了解城市发展的生态承载力,即限制因素或“瓶颈”;更应该把握好城市发展过程中的各种生态关系。

水是生态文明城市的动脉。我们定义了水生态文明城市建设的6条标准,包括:水生态安全、水环境保护、水资源可持续、水景观美好、水文化传承以及水经济繁荣。水生态文明建设是生态城市基础建设的关键,是以水资源环境承载力为基础,因此,所谓生态城市也就是以流域水资源、自然资源、地形资源、植被资源、气候资源等生态资源承载力为本底,实现人与生态资源的和谐共生、经济与生态资源的可持续发展、社会与生态资源的良性循环、城市基础设施及空间格局与生态资源的相互吻合,并以可持续发展为目标的资源节约型、环境友好型城市^[5]。

以往的城市建设是让水按人们的意志改道、去弯取直,改宽阔的河漫滩为狭窄的河床和两边高堤岸。更有甚者,围湖造城或在百年洪水线内建城。生态城市要求城市空间优先考虑水系的自然格局,城市顺应水系格局而建。城市建设应该避开按年均和历史最大连续降雨量区划百年一遇洪水淹没区,并将淹没区用于湿地公园建设、水系建设、农用地建设,给洪水留有足够的空间。

生态城市就是要求将城市建设在百年一遇的洪水线高程之上,即保证了城市的防洪防旱防内涝的功能,又实现城市临水而居的宜居环境。因此,城市防洪防旱防内涝的建设及城市临水而居的宜居环境建设是生态城市建设的关键要素,也是生态城市建设的重要理念。我们反复呼吁,要将城市发展的建筑安全标高设置在预计历史连续极端降雨的最高洪水线水平之上。简言之,生态城市建设就是把自然最可能发生的极端状况,用自然的方法,

通过科学的设计,消除、减缓、避开其可能对城市或对城市生态系统造成的改变和破坏。

未来技术的发展和自然的变迁都将对生态保护构成最大的挑战,尤其是在全球气候变化的情况下。我们可以不必争论全球变暖是否成立,或者是否会导致全球气温升高1℃或3℃,但更应该关心极端降雨、极端暴风雪、极端洪水和干旱、极端寒冷和炎热等极端天气,以及由于局部和区域性冰川融化而导致的海平面和湖水水位的上升。尤其是所有这些极端事件与环境污染和资源枯竭相结合,使可持续性变得极不确定,并使社会和我们赖以生存的环境处于前所未有的危险之中。这是实实在在的威胁,我们必须面对挑战,保证城市的生态安全。

8 流域生态系统修复和保护生态关系

流域是陆地河流水系地表汇水面积内所有生态系统的统称。长度包括河流源头到出海口,流域水系包括主河道以及所有大大小小的分支,流域总汇水面积包括大小支流的小汇水面积,这些大大小小的流域之间被“分水岭”(山脊或波峰线)所分开;大大小小的汇水面积形成大大小小的流域,即大大小小的生态系统(例如,河流生态系统、湖泊生态系统、湿地生态系统、森林系统、农业生态系统、城市生态系统,等),也称之为流域生态系统。流域内大大小小的汇水空间面积形成流域景观,流域景观包括不同的景观空间格局。例如,河流景观、湖泊景观、湿地景观、森林景观、农业景观、城市景观,等。研究流域景观就是研究流域景观的空间生态承载力、空间生态关系、空间格局、空间动态、空间生态过程、时空尺度,以及流域空间(景观)生态可持续性。

流域生态系统修复目标必须很清楚,而且要具有可操作性、可检验性,还要有预算及可行性研究报告。以美国纽约为例,20世纪90年代,为了满足纽约市日益增长的城市建设和市民用水需求,市政府需要预算60~80亿美元用于水厂的建设,以及每年5亿美元的运行费用。这对纽约政府是不小的

财政压力。而且,还有建设周期长、拆迁纠纷多、运维成本高等诸多不确定因素及风险。

政府与流域生态学家经过反复研究和论证,决定通过流域生态修复的具体举措,保证流域内水系湖泊的水质达到一类水的水质标准的生态修复目标,水系的水可以直接引入纽约市作为饮用水。生态学家和政府管理者共同创建有效的流域生态修复解决方案。因为这一解决方案包括了整个流域不同的生态系统和许多利益相关者的利益,所以这些生态修复的方案是成功的。仅用了14亿美元的生态修复工程,最终实现了流域水系一类水水质。流域内逐级自然净化的水系湖泊的水,直接进入城市供水管道,在进入千家万户前加氯消毒。政府节省建设水厂开支和运维成本,城市居民喝上流域生态安全水。

流域生态系统修复与流域生态系统健康息息相关。之所以需要生态修复,是因为种种原因,人类的活动使流域生态系统偏离了生态系统健康的轨道。

美国国会于1992年批准了美国陆军工程兵团(USACE)和南佛罗里达水管区(SFWMD)提议的基西米河(Kissimmee River)流域生态修复工程。当该项目于2020年完成时,恢复了120多 km^2 的河漫滩生态系统,包括近8000 hm^2 的湿地和74 km长的历史废弃河道。

1944年以前,基西米河曾在佛罗里达州中部蜿蜒173 km,从奥兰多(迪士尼的城市)到奥基乔比湖(Lake Okeechobee)。其泛滥平原宽达3.6 km,长期被季节性大雨淹没。那里生长着湿地植物,涉水鸟和鱼。由于长时间的洪水对人类居住生产活动造成了严重影响,因此佛罗里达州要求国会提供援助。国会责成美国陆军工程兵团,在1962—1971年,将基西米河切开开掘成一条10 m深、37 km长的排洪渠道,称为C-38运河。历时近10年,花费9.7亿美元,将173 km长的自然河流取直为136 km。

该项目获得了减少洪灾的好处,但同时也损害了河漫滩的湿地生态系统、水岸生态系统;鸟类和禽类等野生动物生境遭到严重的破坏。湿地的消失使流域生态系统失去自净化功能,水系污染、水

质恶化,生态系统严重退化,也反过来影响了当地的居住环境和生产环境。水系污染还污染了奥基乔比湖、墨西哥湾及大西洋海湾。

经过广泛的研究和规划,1999年开始了生态恢复建设。该项目2001年完成基西米河流域下游的第1期工程;2010年恢复了自然河段的弯曲;2020年完成第2和第3期工程,包括回填37 km的C-38运河以及恢复该河74 km的自然弯曲河道,并完成了基西米河恢复所需的约99%的土地收购,总计4.1万 hm^2 。3500 hm^2 的洪泛区得到恢复。

自然生态系统系统的恢复和生境恢复反应大大超出了预期。河流及其洪泛平原以显著的方式得到改善。许多种类的鸭子和涉水鸟出现,包括环颈鸭、美国长嘴鳄和黑颈高跷,而这些物种在施工前的调查中都不存在。另外,湿地植物在洪泛区蓬勃发展,包括箭头草和柳树。河底的有机沉积物减少了71%(自然湿地生态系统的有机沉积物为每年约1 mm,而污染水系的有机沉积物每年可大于15 cm),重建沙洲并为水鸟和无脊椎动物提供生境,水系溶解氧的提高对于鱼类和其他生物的长期生存至关重要,水生生物的数量增加6倍。长腿涉水鸟种群,包括大白鹭、白鹭和小蓝鹭,明显增加。

为了基西米河流域生态系统修复的成功,美国陆军工程兵团(USACE)和南佛罗里达水管区(SFWMD)整整花了18年(1992—2020年),并付出了38.4亿美元的代价。

9 长江流域生态大保护的生态关系

长江流域生态大保护是支撑长江经济带经济发展的大战略。长江生态大保护的经济代价是巨大的,但是,生态大保护的投入也将成为新的经济引擎、新的GDP。为此,我们提出长江经济带生态大保护、大修复、大发展的十大目标及战略措施。实现长江经济带生态大保护的十大战略措施需总体投入十万多亿(111720亿)元。换言之,为了再造新长江,实现生态长江、美丽长江的中国梦,需付出相当于2015年长江经济带GDP总量1/3的代价。但是,生态修复所投入的十万多亿,也是GDP的一

部分。这些生态修复的代价(GDP)将为实现区域生态、经济、社会的协调和可持续发展铺平道路。可以预测,长江生态大保护在未来10年的保护、修复与发展过程中,将实现40万亿元的总体效益^[6]。

经过全流域的考察,针对目前长江流域存在的问题和长江生态大保护面临的挑战,我们提出的长江经济带生态大保护的十大目标及战略措施是:

1) 防治污染、源头阻断、综合整治水系(包括各大小支流、湖泊、湿地)的水质污染和面源污染,强化全流域的污水处理尾水达到地表IV类水、实现长江三类水水质:这是保护水资源、恢复鱼类水生生态系统、保护生物多样性、实现水清岸美、提升城市品质的根本保障。

2) 大力提倡大坝管理充分兼顾生态系统水温、水流速、水量、洪峰、泥沙量的要求,加强长江水系岸线的生态保护,减少大坝对水系生态系统的影响:这是确保上游水电大坝群开发的可持续发展和水电安全的根本。

3) 加强湖泊生态系统修复、河湖联通、设立闸门、调节蓄水和自然水位,修复湿地、提升水系的自净化能力,退田还湖、恢复湖泊历史面积:这是保护生物多样性、防洪防旱防内涝、最大优化利用雨洪资源的重大措施。

4) 保育流域内的森林植被,保护和修复水岸边的植被带、草坡草沟,修复水系岸边的生态驳岸、软驳岸和湿地:这是防治面源污染的三道防线,是提升水系自净化系统的保障,是连接陆地生态系统与水生生态系统的关键。

5) 建立入海口水质、水量、洪峰、泥沙等安全预警系统,改善滨海城市与滨海生态环境,减少对海滩海涂、海岸线、浅海的污染:保障600 km的海岸线、海滩海涂、6000 km²的浅海海域的蓝水水质和优美环境(万亿资产),形成中国真正宜居、宜业、美丽、生态的滨海城市群。

6) 减少水土流失、防止农业污染、保障耕地、减少土壤污染,保障食品安全:流域水质安全关系到土壤安全,土壤安全对国家粮食安全、食品安全至关重要,水安全和水土流失促使优质耕地急剧减少、基础地力持续下降,水土流失、土壤酸化、土壤

污染是流域生态大保护的焦点,是建设用地土壤环境安全的基本保障,更是食品安全的基本保障。

7) 水生生态系统修复、濒危水生生物种保护、生物多样性保护、鸟类种群和生境恢复:“生物多样性”是指对生物(动物、植物、微生物)与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的保护,也包括对水生生态系统多样性、生物种(尤其是濒危生物种)多样性和基因多样性的保护。生物多样性是人类赖以生存的条件,是经济社会可持续发展的基础,是生态安全和粮食安全的保障。

8) 保障江湖海、支流与干流联通及生态系统安全,发展江湖海联运和干支直达运输,打造畅通、高效、平安、绿色的黄金水道,促使长江黄金水道运输物流功能最大化、高效化:这是长江经济带全方位对外开放新优势、建设绿色生态廊道、创新区域协调发展的重要保障。

9) 在各小流域和城市区域打造海绵城市、建设宜居、宜业、生态、美丽的新型城镇:海绵城市建设是流域水资源和水质保护、城市雨洪资源管理、地下水地表水保护、城市雨污分流、美化城市的国家战略,也是水资源管理的创新模式。

10) 加强流域生态大保护的规划、研究、管理和完善相关政策、法律法规:启动长江流域生态大保护的总体规划、成立长江流域生态大保护研究院、确立长江流域生态大保护管理委员会的权限和责任、出台一系列的长江流域生态大保护的政策、生态补偿机制、法律法规。

10 黄河流域生态修复的生态关系

黄河流域生态修复可以将黄河流域分为4个河段(区域)来建立生态修复各自的修复目标和预算。上游作为三江源国家公园重点保护区;中游黄土高原重点恢复植被区,重点在于减少水土流失、恢复植被,但是不应该追求“黄河清”;黄河流域生态修复的核心区将是黄河下游滩区的生态治理和改造,黄河下游滩区再造与生态治理实现治河与经济的有效结合,对助推中原经济区快速发展具有重要意义。

1) 黄河上游生态大保护与三江源国家公园保护。

黄河上游段从河源至贵德,两岸多系山岭及草地高原,海拔均在3000 m以上,高峰可超过4000 m,河道呈“S”,河源段400 km内河道曲折,两岸多湖泊、草地、沼泽,河水清,水流稳定,水分消耗少,产水量大,多湖泊,黄河流过星宿海向东有上游最大的湖泊——扎陵湖和鄂陵湖(又称为“黄河源头姊妹湖”),气候为高原寒冷,鱼类系中亚高原区系,种类少,鱼类资源、水资源等生态资源丰富^[17]。

黄河上游水源涵养功能严重减退。由于黄河源区森林植被大面积破坏,水土流失日益严重,源区水源涵养调节功能明显下降。表现为湿地缩小、湖泊萎缩、径流减少。近年来,源区许多小湖泊消失或成为盐沼地,湿地变为旱草滩。黄河源头的两大“蓄水池”鄂陵湖和扎陵湖水位已经下降了2 m以上,并且两湖间曾经发生过断流。目前,鄂陵湖出湖水量只有3 m³/s。黄河上游水源涵养功能和生态系统的脆弱性以及全球气候变暖的影响,决定了对保护水资源及生物多样性具有极大的挑战。因此,应该:(1) 扩大三江源国家公园保护区范围,包括雪山、森林、湖泊、湿地;(2) 将整个三江源国家公园归属中央政府国家公园管理局统一管理;(3) 划定三江源国家公园无人区,不允许任何车辆人员进入,应该禁止三江源国家公园的旅游和各种开发(实行特别保护条例);(4) 建立三江源国家公园研究院,应对未来各种挑战,包括全球气候变化加强对策性研究;(5) 加强三江源国家公园管理团队的建设和科学素养培训。

2) 黄河流域中游黄土高原地区生态修复重点。

黄河流域中游黄土高原地区恶化生态环境,制约经济社会发展。水土流失造成耕地面积减少、土壤肥力下降、土地生产力降低,形成了“越穷越垦、越垦越穷”的恶性循环,使生态环境不断恶化,加剧了贫困,制约了经济发展^[18]。特别建议:(1) 黄河中游黄土高原生态修复重点在于恢复植被、减少水土流失,但是,不应该追求“黄河清”,黄河泥沙是黄河的自然属性,造就了华北平原,是大自然给中华

大地的恩赐,应该加强研究如何顺应自然,保护好母亲河;(2) 黄河中游黄土高原恢复植被工程是极其复杂,也是最具挑战性的生态工程,应该集聚天下英才共同商议解决方案;(3) 黄河流域生态修复的宗旨是把黄河流域的治理和生态修复有机地与三农问题结合起来,与脱贫致富结合起来;(4) 让农民成为一个有尊严的职业,一个有文化的个体,一个有文明的公民;让农业成为有奔头的产业。

3) 黄河流域中游河套地区生态修复与农业发展。

河套地区,是指黄河“几”字弯和其周边流域。河套自古以来就为中华民族提供了丰富的文化资源及生活资源^[19]。河套的地形在世界大江大河里绝无仅有。河套周边地区,包括湟水流域、洮水流域、洛水流域、渭水流域、汾水流域、桑干河流域、漳水流域、滹沱河流域,都具有比较好的自然环境条件。它们环绕着河套地区,正如众星捧月一样,把河套文明推到了最高峰,同时又把河套文明传播到更广阔的区域之中。俗语说:“黄河百害,唯富一套”“天下黄河富河套,富了前套富后套”。河套地区土壤肥沃,灌溉系统发达,适于种植小麦、水稻、谷、大豆、高粱、玉米、甜菜等作物,一向是西北最主要的农业区。今天,河套地区被称为“塞外米粮川”^[20]。河套地区的畜牧业和水产业也很发达。该地区的生态修复应该:(1) 更多地融入农业生态、节水农业、光伏农业;(2) 把耕地整治、开发与水系水岸植被保护和植被生态修复结合起来;(3) 发展高科技农业和农业自动控制系统,打造智能化农业生产高地、推动智能节水节能工程、病虫害智能防控、安全食品生产基地、生产环境智能化控制、生态标准示范农田;(4) 建设高科技高附加值农业、智能自动控制系统农业、旅游、采摘、返璞归真农业;把农村建设成为宜居向往的地方,加强生态基础设施建设、完善的医疗教育市政服务、弘扬传统特色的民俗民居文化,把农田打造成美丽生态景观和田园综合体;(5) 推行可实施的商业模式、投融资模式和管理模式,全面实现黄河流域的乡村振兴。

4) 黄河下游生态修复与黄河出海口国家湿地公园。

黄河下游滩区居黄河下游的上首,河流从此冲出峡谷,进入平原,呈扇形陡然展宽,比降变缓(纵、横比降在 1/5000~1/7000),由于大量泥沙淤积,河道宽、浅、散、乱,主流摆动频繁,系典型的游荡型河段^[21]。黄河下游滩区总面积 3154 km²,现有耕地 22.7 万 hm²,村庄 1928 个,人口 189.52 万人,受制于特殊的自然地理条件和安全建设进度,滩区经济发展落后,人民生活贫困^[22]。结合新时期国家发展战略及治水新思路,考虑黄河下游自然特点和水沙输移规律,建议:(1) 打造从郑州到黄河口宽 10~50 km、长 500 km 的新时代黄河下游国家森林公园,“充分扩展洪泛平原湿地和森林,泥沙分区落淤,保护地表水资源,补充地下水资源”的生态治理工程。(2) 为消除洪水的威胁,最大限度地保护黄河水资源。另外,滩区安全建设应该将村庄建设在最大洪水线以上,或者围堰高于最大洪水线,保障村庄和群众的生活生产安全,提高生活水平。(3) 依据黄河水沙水动力理论和国家发展战略,提出的黄河下游滩区再造与生态治理方案,既保留了黄河下游滩区水沙交换和滞洪沉沙功能,又解决了滩区群众的安全和发展问题,实现治河与经济的有效结合。(4) 应该尽快开展黄河下游滩区再造与生态治理研究,同时在下流选取典型滩区试点,编制试点河段治理实施方案,开展试点治理试验,并逐步向全下游河道推广。(5) 黄河下游大面积滩区的形成,既具有自然属性又具有社会属性,也是黄河河床演变历史上滞洪沉沙需要的自然过程和必然结果。黄河流域生态修复就是要顺应黄河水沙这种自然动态规律。(6) 黄河滩区生产堤是影响黄河下游河道滩槽水沙交换、加重主河槽淤积的一个重要原因。从治河防洪的角度出发,需要废除生产堤,或者改造成为围堰,保护群众的生活生产,并通过建立黄河下游国家森林公园,从根本上消除洪水隐患。(7) 从保护滩区群众的利益出发,需要保留一定高度的生产堤或改造为围堰,以防止小洪水频繁漫滩受灾。生产堤既关系到治河防洪,又关系到滩区群众的生产生活,因此,应该加快进行黄河滩区生产堤问题的研究,提出具体方案。

参考文献 (References)

- [1] O'Neill R V, DeAngelis D L, Waide J B, et al. A hierarchical concept of ecosystems[M]. Princeton: Princeton University Press, 1986: 253.
- [2] Li B L. Why is the holistic approach becoming so important in landscape ecology?[J]. Landscape and Urban Planning, 2000, 50(1-3): 27-41.
- [3] Chou S K, Costanza R, Earis P, et al. Priority areas at the frontiers of ecology and energy[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2018, 4: 243-246.
- [4] 王浩,李文华,李百炼,等. 绿水青山的国家战略、生态技术及经济学[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2019: 247.
- [5] 方立娇. 长江及市内水系与武汉市的发展[DB/OL]. [2021-01-01]. <https://wenku.baidu.com/view/1fad177a31b765ce050814ba.html>.
- [6] Wu Y, Swain R E, Jiang N, et al. Design with nature and eco-city design[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6: 1.
- [7] Wu Y, Wang N, Rutchey K. An analysis of spatial complexity of ridge and slough patterns in the Everglades ecosystem[J]. Ecological Complexity, 2006, 3(3): 183-192.
- [8] Daly H E, Farley J. Ecological economics: Principles and applications[M]. 2nd ed. Washington, DC: Island Press, 2004.
- [9] 李文华. 生态补偿与资源保育[M]. 北京:高教出版社, 2011.
- [10] Bensel T, Turk J. Contemporary environmental issues [M]. San Diego, CA: Bridgepoint Education: 2011.
- [11] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [12] Li B L. Pansystems analysis: A new approach to ecosystem modelling[J]. Ecological Modelling, 1986, 32(1-3): 227-236.
- [13] 伍业钢. 海绵城市设计:理念、技术、案例[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2016: 287.
- [14] 张成梁, Li B L. 美国煤矿废弃地的生态修复[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 276-285.
- [15] 伍业钢, 斯慧明. 生态城市设计:中国新型城镇化的生态学解读[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2018: 373.
- [16] Chen Y, Zhang S, Huang D, et al. The development of China's Yangtze River Economic Belt: How to make it in a green way?[J]. Science Bulletin, 2017, 62(9): 648-

- 651.
- [17] 梁象武. 黄河的发源地及主要支流[J]. 山西水土保持科技, 1986(3): 41.
- [18] 刘国彬, 王兵, 卫伟, 等. 黄土高原水土流失综合治理技术及示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7074-7077.
- [19] 杨志文. “任性”黄河最美逆行, 成全河套独好风景[EB/OL]. [2021-01-01]. http://travel.ce.cn/gdtj/201709/07/t20170907_5644743.shtml.
- [20] 李爱平. 解读河套地区的远古与“文明变迁”[N]. 内蒙古晨报: 2010-09-12.
- [21] 乔丽芳, 陈亮明, 张毅川. 郑州黄河滩地景观可持续发展研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(6): 20-24.
- [22] 王兵, 仝亮, 潘元庆, 等. 河南省黄河滩区开发利用现状及发展前景[J]. 河南农业科学, 2008(11): 64-66.

On the ecological relationship between ecological protection and green development during the 14th Five-Year Plan

LI B. Larry¹, WU Yegang²

1. Ecological Complexity and Modeling Laboratory, University of California, Riverside, CA 92521-0124, USA

2. Beijing Bold Institute of Eco-City Planning and Design, Beijing 100105, China

Abstract Ecological protection and green development are mutually reinforcing. From the perspective of the ecological relationship between protection and development during the "14th Five-Year Plan", ten ecological relations between ecological protection and green development are explored, and a series of across spatiotemporal scale ecological relations, ecological wisdom and ecotechnology related to ecological protection and green development are discussed. Clarifying these ten major ecological relationships will help China comprehensively carry out ecological protection and green development, improve the overall quality of China's ecological protection and green development, and help build a beautiful China and achieve a even more sustainable development.

Keywords ecology; ecological economics; ecological wisdom; ecotechnology; landscape ecology ●



(责任编辑 王丽娜)