

近 200 年来额济纳绿洲土地荒漠化进程及其驱动机制

马燕^{1,2}, 李志萍², 曹希强³

(1. 中国地质大学 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011; 3. 河南省国土资源科学研究院, 郑州 450053)

摘 要: 20 世纪 50 年代以来, 额济纳地区生态环境不断恶化, 引发众多学者对其环境变化及驱动机制进行研究。通过对黑河下游天鹅湖—2 孔湖泊沉积柱状岩芯的多环境指标的分析, 同时参照相关的历史文献记录, 提取了其中包含的气候变化和人类活动信息。根据湖泊沉积记录与历史文献记录的对比研究, 将额济纳地区近 200 a 环境演变分为 7 个阶段。近 200 a 来额济纳地区环境演变体现在两方面, 一是水系变迁包括额济纳河的溯源退缩和尾间湖泊的萎缩干涸; 二是额济纳绿洲退缩, 土地荒漠化加剧。影响该地区环境演变的主要因素包括气候变化和人类活动, 在这两个因素的共同影响下, 水环境的变化成为额济纳绿洲荒漠化发展的主要驱动力。

关键词: 额济纳绿洲; 荒漠化; 驱动机制

中图分类号: X37; X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0158-05

Study of Land Desertification and Its Driving Mechanism in Ejina Oasis During Recent 200 Years

MA Yan^{1,2}, LI Zhi-ping², CAO Xi-qiang³

(1. School of Water Resources and Environment of China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. Henan Academy of Land and Resources, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: Since the 1950s, the environment of Ejina Region has been deteriorating continually, which has become the study focus. In this study, based on the data of environmental multi-proxy of lake sediments from Tianehu-2 core in Tianehu Lake one of the tail-lakes of Heihe River, and comparative study with the historical document records, the contained information of climate changes and human activities is distilled. According to the results of comparative study between the information recorded by lake sediment and historical document records, evolvement of Ejina Oasis during recent 200 years is divided into 7 phases. Environmental evolution in Ejina Oasis during recent 200 years mainly embodies in two aspects. Firstly, drainage change includes processes of Ejina River shrinking with tracing to the sources and tail lakes drying out and shrinkage. Secondly, oasis desertification constantly increases. The drainage change caused by the interaction of climate changing and human activities has been considered as the driving mechanism of land desertification.

Key words: Ejina Oasis; land desertification; driving mechanism

黑河是中国西北干旱区的一条内陆河, 它发源于祁连山, 干流长 821 km, 流域面积 13 万 km², 其自狼心山进入额济纳旗境内, 分为东、西两条支流, 继而分叉形成许多支流, 呈辐射状向下游扩散, 最终注入终端湖——索果诺尔(东居延海)和嘎顺诺尔(西居延海), 形成了广阔的内陆河三角洲, 并发育成为著名的额济纳天然绿洲^[1]。

据相关资料记载^[2-4], 额济纳地区曾有过水草丰茂、繁荣兴旺的时期, 但近代以来额济纳绿洲荒漠化过程加剧, 绿洲萎缩, 生态恶化。不断恶化的生态环境直接影响当地人民的生产和生活, 也吸引众多学者探索生态环境恶化发生、发展的过程及驱动机制。本文通过黑河下游尾间湖泊天鹅湖的湖泊沉积记录, 并查阅相关历史文献, 对额济纳地区近 200 a 来自自然环

境演变进行研究,探讨其变化过程和驱动机制,为保护和恢复额济纳绿洲生态环境提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 自然环境概况

额济纳绿洲位于内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗境内,地处内蒙古高原西端阿拉善极端干旱荒漠地带,额济纳河下游洪积三角洲,地理位置位于 $97^{\circ}10' - 103^{\circ}7' E$, $40^{\circ}30' - 42^{\circ}30' N$,是我国蒙古族聚居的地方。额济纳绿洲气候极端干旱,属大陆性极端干旱气候区,具有降水稀少,地表水资源贫乏,地下水补给量少,蒸发强烈,温差大,风大沙多,日照时间长,干燥度大,易起风暴等特点。

额济纳河是进入额济纳地区唯一的河流,黑河流入内蒙古境内后至狼心山处又分为额济纳东河和西河两支,下游分支河道多达10余条,漫流于三角洲平原之上,最后汇入东、西居延海。

1.2 额济纳地区社会经济概况

额济纳地区历史悠久,人杰地灵。历史上额济纳地区多为民族杂居区,由于各民族势力的消长和居住区的变迁,农牧业生产相应出现变更。整个历史时期可以划分为以下几个阶段^[3]:汉代开发河西之前,一直是少数民族游牧地;两汉三国时期以农业为主;两晋南北朝隋唐时期畜牧业占优势;夏元时期农牧业并重发展;明清民国时期完全以畜牧业为主;建国以来为农牧业综合发展时期。纵观额济纳地区的农牧业变迁历史,农业占主导地位,大多因为戍边的目的。一旦少数民族占领,就又恢复畜牧业的主导地位。由于干旱的气候环境,决定了畜牧业的基础地位,因此在整个农牧业变迁过程中,畜牧业具有非常好的长期的稳定性,农业则呈现阶段性特点。

2 样品采集与研究方法

本研究采用野外采样、室内实验和查阅历史文献相结合的研究方法,通过对黑河下游额济纳旗境内的天鹅湖-2孔的高分辨率的分析测试,包括磁化率、碳酸盐含量等,并结合精确的测年数据,提取其包含的气候变化和人类活动信息。

天鹅湖-2孔样芯于2004年9月5日在内蒙古额济纳旗境内的天鹅湖采集,岩芯长度为84.5 cm。该样芯主要以粉砂为主,并含有黑色有机质以及水草根系。以0.5 cm为间隔分割岩芯,共取得样品169个,经过风干、研磨、过筛、称重后分别采用MS2磁化率仪和GM Y-II型碳酸盐含量测定仪得到每个样品的磁化率和碳酸盐含量数据(见图1)。另外利用γ

谱仪²¹⁰Pb比活度测定天鹅湖湖泊沉积物沉积速率为0.491 cm/a,据此推算天鹅湖-2孔所代表的沉积年代约为200 a。

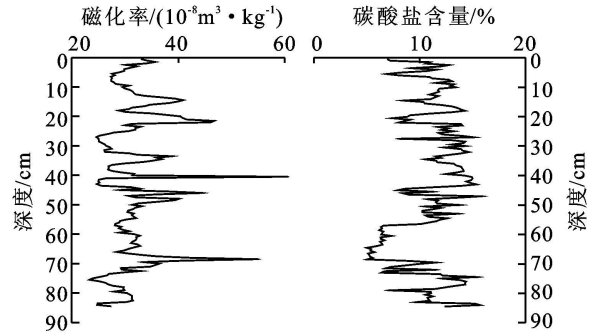


图1 天鹅湖-2孔碳酸盐含量变化及其与磁化率对比

3 额济纳地区环境演变过程

3.1 湖泊沉积记录的环境变化与人类活动信息

通过天鹅湖-2孔湖泊沉积环境分析,将近200 a以来湖泊环境演变分为7个阶段。

(1) 阶段I(约1800-1850AD):气候干冷、湖泊水位较低。该阶段天鹅湖-2孔碳酸盐含量较高,指示湖泊盐度较高,而水位较低,与而天鹅湖-2孔的磁化率偏低,指示了干冷的气候条件,且与碳酸盐含量负向相关性较为显著,说明该段时期气候总体趋向干冷。而古里雅冰芯反映出的现代小冰期当中就存在着发生在19世纪左右的寒冷事件^[5],靳鹤龄等^[6]已在对东居延海最近1500 a来的变迁与气候变化研究中发现的气候变干冷事件与小冰期气候事件在时间上基本对应,表明此阶段环境变化主要受气候主导,而当时气候干冷是对具有全球意义的小冰期气候变动的响应。

(2) 阶段II(约1850-1860AD):气候逐渐变暖湿,湖泊水位总体较高,但中间出现几次较强的波动,人类活动影响加强。该阶段天鹅湖-2孔的碳酸盐含量经过几次波动后,总体比上一个阶段降低,说明湖泊水位虽经历几次波动但总体处于较高水平,这与小冰期后期气候逐渐回暖变湿的大趋势相对应,其中在样芯68.5 cm处出现了最小值,表明在1860AD左右天鹅湖出现了近200 a来的最高水位。与此对应,天鹅湖-2孔磁化率在样芯的68.5 cm处出现最大值,磁化率涨幅非常剧烈,但在小冰期后期的气候背景下,磁化率的大幅度增加并不是受气候主导的,即磁化率的最大值并不指示当时气候环境最为暖湿;加之该阶段碳酸盐含量和磁化率的负向相关性也比较差,显示该阶段影响湖泊沉积物磁化率变化的因素较为复杂,可能有人类活动的参与。而张振克^[7]等在对2600 a来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁研

究中发现农业生产加速了土壤侵蚀,结果造成入湖细铁磁性颗粒增加,引起湖泊沉积物磁化率升高,因此磁化率的迅速升高可能与当时天鹅湖周边地区大规模的农业及畜牧业开发有关。

(3) 阶段 III(约 1860–1910AD): 开始进入 20 世纪暖期,气候趋向暖干化,湖泊萎缩。该阶段天鹅湖–2 孔碳酸盐含量的变化分为两个阶段,1860–1885AD 期间,湖泊水体盐度维持在一个较低水平,说明在此期间湖泊水位基本维持在较高水平,且没有出现较大的波动,湖区气候暖湿且较为稳定;在样芯的 57 cm 处,碳酸盐含量突然增大,且增幅明显,说明在其对应的年代即 1885AD 左右,湖泊水位突然下降,这与文献记载“额济纳旗在 1880–1894 年期间接连发生了几次大旱,导致天鹅湖严重萎缩”^[8]相互印证。而该阶段磁化率值稳定在一个较低水平,磁性矿物的种类和含量变化均不大,说明同时期从地表进入湖泊沉积的细颗粒磁性矿物较少,主要因气候干旱造成河流干涸、入湖补给量小所致。以上湖泊沉积记录都指示了随着小冰期的结束,气候逐渐趋向暖干化,开始进入 20 世纪暖期。

(4) 阶段 IV(约 1910–1930AD): 气候持续暖干化,湖泊水位较低。该阶段天鹅湖–2 孔的碳酸盐含量变化曲线表现为两个弱峰值,均没有出现较强烈的波动,碳酸盐含量持续偏高,说明该时期湖泊水体盐度较高,湖泊水位较低,间接反映了当时湖泊得到降水和径流补给都较少。从该阶段磁化率表现为两个谷值,与碳酸盐含量的变化呈负相关,且均无较大波动,两者所指示的环境变化较为一致,说明在持续趋于暖干的气候条件下蒸发量远远大于降水量,湖泊水位较低,继续呈萎缩状态;另外据记载^[1],由于黑河上中游农业发展,致使额济纳河每年 5–7 月“常致干涸”,使湖泊长时间得不到上游补给,这也是导致湖泊水位降低的一个重要原因。

(5) 阶段 V(约 1930–1955AD): 气候开始向暖湿转变,但湖泊水位仍较低。该阶段天鹅湖–2 孔的碳酸盐含量达到整个样芯的最高值,但也出现过较大的波动,说明该段时期内总体上湖泊水体盐度最高,水位最低,湖泊持续萎缩,只是在 1945AD 左右天鹅湖–2 孔的碳酸盐含量出现了一个低值,证明当时出现了短时间的较高水位。而内蒙古地区在 20 世纪 30 年代以来持续干旱,至 40 年代后期,旱情开始有所缓解^[9];同时近 50 a 以来黑河上游来水变化不大,但降水有所增多^[10],气候有由暖干向暖湿转化的趋势^[7],因此这次短时间的高水位应该与气候的转变有

关。该阶段磁化率也有增强的趋势,与暖湿的气候变化趋势相一致,但与碳酸盐含量的负线性相关较差;而且经历这次高水位之后天鹅湖水位再次持续偏低,说明造成湖泊干涸绝不是气候变化的原因,人类活动必然产生了重大的影响。1941 年国民党政府堵塞东河,使来水流入西河,致使后来的十年东河干枯^[1],而东河作为下游主要过水河道,也是额济纳东部众多尾间湖泊的主要补给来源,因此补给断流是造成当时天鹅湖干涸的主要原因之一。

(6) 阶段 VI(约 1955–1970AD): 气候干旱背景下出现几次洪涝,湖泊经历了高水位–低水位–高水位的变化。该阶段天鹅湖–2 孔的碳酸盐含量表现为一个峰值,经历了由小变大再变小的过程,说明该阶段湖泊经历了高水位–低水位–高水位的变化过程;同期磁化率的变化与此相适应,表现为一个谷值,两者呈较显著负向相关,因此该阶段气候变化对湖泊沉积记录的影响比较大。根据历史文献中的气候记录^[9],20 世纪 60 年代初期,额济纳旗所在的阿拉善盟连续发生了几次洪涝灾害,包括连降暴雨造成的山洪暴发和过境黄河决口,这些突发的洪涝灾害,使得湖泊水位升高,这也是该阶段前期碳酸盐含量偏低的主要原因。在几次洪涝之后,1965 年左右开始气候再次变得干旱,湖泊再一次萎缩。同时,建国后水利工程的建设也极大地改变了黑河下游地区水资源的空间分配^[10],使黑河下游流量进一步减小,从而导致下游尾间湖泊的干涸。

(7) 阶段 VII(1970AD 至今): 气候暖干,湖泊萎缩。该阶段天鹅湖–2 孔碳酸盐含量先维持在较高值段,只是在表层附近较低,这与最近几年来天鹅湖水位较高的情况相符。而该阶段磁化率的变化也比较平稳,说明这一时期湖泊基本上处于水位较低的萎缩状态。从气候记录上来看,近 30 a 来额济纳旗基本上连年干旱,只有 1981 年出现过一次连降暴雨的情况,而从狼心山水文站水文资料来看^[1],从 1988–1995 黑河下游年度来水量总体呈下降趋势。在 2000 年以后干旱的情况有所改观,天鹅湖再次蓄水。

3.2 额济纳地区的水系变迁

在西北干旱地区,绿洲受水环境的严重制约,有水即成绿洲,无水则为荒漠。额济纳地区历史时期的水系存在从东向西的迁移和萎缩过程。根据龚家栋等^[4]的研究,东西居延海并不是黑河的终端湖,在地质历史时期,属于黑河流域的河道湖。随着黑河水系不断的溯源退缩,东西居延海和居延泽也存在一个逐步缩小的过程,并在近现代演变为尾间湖。

表 1 黑河下游水系变迁历史

时间	河道演变	湖泊演变
晚更新世至全新世早期	额济纳盆地未封闭	—
约 2000 aBP	—	居延泽湖面达到 726 km ²
1270A D	黑城附近河道水量较大	—
元代(1271– 1368AD)	河道西移,居延泽三角洲上的河道开始干涸	嘎顺诺尔开始形成
元末明初	东河的古河道干涸	—
明代	东河恢复径流	索果诺尔形成
约 400~ 600 年以前	—	居延泽干涸
20 世纪 30 年代	东河西部支流流入嘎顺诺尔	嘎顺诺尔深度达 2~ 9 m,面积达到 190 km ² , 索果诺尔深度达到 4 m 左右
1941A D	东河被堵	—
1942– 1952A D	东河干涸	索果诺尔干涸
1947A D	北大河鸳鸯池水库建成	—
1952A D	人工进行东西河分水	—
20 世纪 50 年代中期	鸳鸯池大坝加高数倍	—
20 世纪 50 年代中期	解放村水库建成	—
1958A D	—	嘎顺诺尔面积达 267 km ² ,而索果诺尔面积达 35. 5km ²
20 世纪 50 年代末	北大河再无水量汇入黑河	—
1961 年至今	—	嘎顺诺尔干涸
1973– 2000A D	—	索果诺尔间歇性干涸
2000 年至今	—	索果诺尔重新充水天鹅湖重新充水

3.3 额济纳地区沙漠化发展进程和现状

土地沙漠化是土地荒漠化的一种主要类型,其中土壤风蚀是流域最主要的土地沙漠化的现代过程之一。根据流域土地沙漠化发生性质、地表形态的发育趋向以及风蚀程度等,将流动沙丘、固定与半固定沙丘、风蚀戈壁等荒漠化土地类型划归沙漠化土地范围^[11]。

目前沙漠化土地已经遍布全旗,包括现代河水三角洲地区。据统计,全旗现代沙化土地面积 155. 54 万 hm²,其中流动沙丘面积约 95. 31 万 hm²,固定和半固定沙丘面积约 60. 23 万 hm²,覆沙或砾石戈壁滩面积约 483. 05 万 hm²,沙漠化土地占土地总面积的 62. 32%,是绿洲(耕地、林地、草地与水域面积之和)的 1. 70 倍;流动沙丘面积占沙漠化土地总面积的 14. 92%,约占风沙化土地面积的 61. 28%;戈壁滩地占土地总面积的 75. 60%^[12]。从上述沙漠化分布指数可以看出,额济纳旗境内沙漠化土地已经成为主要的土壤环境构成要素,现状沙漠化土地中尚以风蚀戈壁为主,但风蚀沙漠化土地中以流动沙丘占据绝对优势,反映出现代沙漠化演进程度和潜在危害性都十分严重。昔日以黑城为代表的古居延绿洲现大多成为流动或半固定沙丘,深居绿洲内部的古河床或废弃干涸的河床遍布三角洲地区,这些都是沙漠化的策源地,绿洲生态十分脆弱。

4 额济纳绿洲土地沙漠化驱动机制

长期以来,众多学者对生态环境变化与人类活动的关系有三种观点:一是强调历史时期以来人类活动的影响^[13],二是强调气候变化的主导作用^[8],三是强调气候变化和人类活动在不同时间尺度的耦合叠加作用^[14]。从天鹅湖- 2 孔近 200 a 来湖泊沉积记录来看,尽管影响湖泊变化的因素很多,但气候变化和人类活动的影响最为重要,人类活动在特定时段对湖泊环境演变产生明显影响,湖泊沉积记录的环境演化主要受气候冷暖干湿变化的控制。

4.1 气候变化的影响

从天鹅湖- 2 孔的指标来看,磁化率减小和碳酸盐含量增大总体上反映气候干旱化、湖泊缩小的趋势,在气候干旱化和湖泊缩小的大背景下,存在着一定程度的气候干湿波动和湖泊盛衰的变化,这种变化与全球性的气候变化具有较好的一致性。靳鹤龄等^[7]在对最近 1 500 a 以来黑河下游东居延海变迁与环境气候变化的研究中也发现,居延海及黑河流域的气候干湿波动和湖泊盛衰变化与全球冷暖更替关系密切。而从天鹅湖- 2 孔的沉积记录来看,近 200 a 内湖区气候的变化可以归纳为:小冰期时气候干冷,湖泊萎缩;小冰期后期,气候开始趋向暖湿,湖泊有扩张的趋势;进入 20 世纪暖期后,气候转向暖干,湖泊

萎缩; 20 世纪 50 年代以后干旱气候有所缓解, 湖泊水位出现一些波动, 但总体暖干的气候仍然造成湖泊萎缩干涸。气候和水系的这种变化趋势, 使得大尺度干旱与沙漠化发展相吻合^[15], 将加剧流域中下游地区沙漠化发展。因此干旱导致黑河及其支流断流而引起嘎顺诺尔、天鹅湖、索果诺尔等众多尾间湖泊相继干涸或大幅度萎缩, 是造成额济纳旗境内绿洲退化, 土地沙漠化的重要原因之一。

4.2 人类活动影响的湖泊水系变迁

天鹅湖-2 孔的湖泊沉积记录还打下了人类活动的烙印, 首先是人类对水资源的利用。进入 20 世纪特别是 20 世纪中期以来, 额济纳地区得到了大规模的开发, 对水资源的利用也发生了翻天覆地的变化。河流湖泊水系逐渐从自然水系、半自然水系演化为人工水系, 地表径流基本上为人类所控制, 天然河道水网已被纵横交错的人工渠系所取代。在人类活动的影响下, 水资源在空间上发生极大的位移, 持续从下游尾间湖向中游和下游上段迁移, 从天然水体向人工水体转化, 由于下游地表径流减少, 导致尾间湖泊萎缩和干涸^[11]。这也是 20 世纪 50 年代期间, 气候虽然由暖干向暖湿转化, 降水有所增多, 天鹅湖仍然处于充水-干涸交替状态的原因。除此以外黑河的终端湖西居延海在 1961 年干涸, 东居延海从 70 年代开始一直处于充水-干涸交替状态^[2]。

人类活动的影响另一方面还表现在历史时期的人类活动, 特别是土地利用方式和强度的变化对环境演变产生重要影响, 并直接被湖泊沉积所记录。在 1850-1860AD, 湖泊沉积物磁化率及频率磁化率急剧上升, 出现了一个极其显著的峰值, 这与当时气候回暖之后, 大规模地进行屯垦和畜牧业开发有关, 农业生产活动引起土地利用方式的改变, 加速了土壤侵蚀, 加之风力搬运, 进入湖泊沉积的细颗粒物在大规模屯垦阶段迅速增加, 引起磁化率和频率磁化率的急剧上升^[8]。进入 20 世纪以来, 连年战乱, 使得额济纳地区人口下降, 农业生产特别是以土地开垦为标志

的耕作业逐渐荒废, 地表细颗粒土壤被风蚀殆尽, 入湖细颗粒物减少, 磁化率与频率磁化率都比较低。同时受到人类活动的影响, 额济纳地区的环境也发生了很大的变化, 具体表现为绿洲范围缩小, 植被退化, 沙堆及灌丛沙堆出现, 土地沙漠化日趋严重^[15]。

参考文献:

- [1] 内蒙古额济纳旗志编委会. 额济纳旗志[M]. 北京: 方志出版社, 1998: 115-565.
- [2] 肖生春, 肖洪浪. 近百年来人类活动对黑河流域水环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 57-62.
- [3] 肖生春, 肖洪浪. 额济纳地区历史时期的农牧业变迁与人地关系演进[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 448-450.
- [4] 龚家栋, 程国栋, 张小由, 等. 黑河下游额济纳地区的环境演变[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 491-496.
- [5] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2ka 来温度和降水变化: 古里雅冰芯记录[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 348-353.
- [6] 靳鹤龄, 肖洪浪, 孙良英, 等. 最近 1500 年黑河下游东居延海变迁与环境气候变化[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 58-65.
- [7] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 45-51.
- [8] 刑野. 内蒙古自然灾害通志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2001: 1-103.
- [9] 王文辉. 内蒙古气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 253-269.
- [10] 王根绪, 程国栋. 近 50 a 来黑河流域水文及生态环境变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 234-238.
- [11] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 126-136.
- [12] 王根绪, 程国栋. 黑河流域土地荒漠化及其变化趋势[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 369-374.
- [13] 党瑜. 历史上西北农业开发及对生态环境的影响[J]. 西北大学学报, 2001, 31(3): 271-276.
- [14] 肖生春, 肖洪浪. 黑河流域环境演变因素研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 1-6.
- [15] 李并成. 河西走廊汉唐沙漠化的调查研究[J]. 地理学报, 1998, 53(2): 106-115.

(上接第 157 页)

- [10] 国土资源部. 低碳排放: 土地利用调控新课题[EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/tdsc/lltt/200912/t20091228_131048.htm
- [11] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略研究报告: 探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 1-6, 11.
- [13] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 91: 217-232.
- [14] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [15] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.