中国潜在湿地分布的模拟

胡胜杰^{①②}, 牛振国^{①*}, 张海英^①, 陈燕芬^{①②}, 宫宁^①

① 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

② 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: niuzg@radi.ac.cn

2015-06-08 收稿, 2015-07-24 接受, 2015-09-23 网络版发表

国家自然科学基金(41271423)和国家高技术研究发展计划重大项目(2009AA122003)资助

摘要 潜在湿地分布的空间信息对于提高湿地制图精度、理解湿地空间分布的变化规律以及制定湿地恢复政策等都具有重要意义. 地形特征对湿地的分布具有决定作用, 通过采用滤波方法识别真实洼地, 并结合气候降水和蒸发资料, 提高了地形特征(气候地形指数)的模拟精度; 基于气候地形指数的空间分布特征及其与潜在湿地分布的时空关系, 采用众数统计方法, 模拟中国潜在湿地分布. 该方法不仅具有一定的物理基础, 而且避免了复杂分布式参数的获取和模型的数值求解, 更适用于大尺度湿地分布研究. 基于多年的气象数据资料的模拟结果表明: 中国潜在湿地约为 $58.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中沼泽湿地面积约为 $32.50 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水体面积约为 $25.68 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在西北部的青藏、新疆地区, 东北部内蒙、黑龙江和吉林地区, 以及华北平原和长江流域. 与已有湿地模拟结果对比表明: 模拟结果在空间分辨率(90 m)和精度方面都有所提高; 与全国湿地调查结果在空间分布格局上具有较高的一致性. 该结果为进一步提高湿地遥感制图精度、制定湿地恢复策略等提供了重要的支撑.

关键词

气候地形指数
洼地识别
潜在湿地分布
中国

湿地作为地球表面重要的自然生态系统之一, 在维持生物多样性、抵御洪水、调节径流、改善环境、控制污染等方面有着巨大的价值^[1]. 潜在湿地是指在仅考虑气候和地形等自然条件下最有可能发育的湿地. 其空间分布信息为遥感湿地制图提供了外边界, 此范围以外区域湿地分布的可能性可以被忽略^[2], 在一定程度上可避免将林地、农用误判为湿地, 有助于提高湿地遥感制图的精度; 而且对于理解湿地分布及变化的时空规律, 制定湿地保护特别是湿地恢复政策具有重要的指导意义.

湿地分布的模拟方法分为基于数理统计的数学方法和基于分布式水文模型的方法. 基于数理统计的方法通过分析湿地与周围土地利用类型和其影响因子之间的统计关系实现湿地模拟与预测. 如凌成星

等人^[3]采用地理元胞机-马克科夫链(CA-MARKOV)模型对北京湿地资源时空格局变化进行模拟预测, 预测结果得出了北京市湿地资源合理、科学的动态变化趋势; 周昊等人^[4]利用逐步逻辑回归模型, 通过分析湿地与其环境因子的相关关系, 对大兴安岭的湿地进行了模拟. 这类方法虽然有坚实的数学基础且易于实现, 但是其湿地模拟的物理机制不清晰, 模型的假设条件常常无法反映复杂的实际情况.

基于分布式水文模型的方法包括地形指数和分布式水文模型. 地形指数(topographic wetness index, TWI)作为刻画地形特征的重要指标, 从1979年首次提出至今, 在湿地的模拟中, 得到了广泛的应用^[5~11]. 如Rodhe等人^[9]将地形指数作为湿度因子, 探索了地形与湿地发生之间的联系, 其研究结果表明地形指

引用格式: 胡胜杰, 牛振国, 张海英, 等. 中国潜在湿地分布的模拟. 科学通报, 2015, 60: 3251–3262

Hu S J, Niu Z G, Zhang H Y, et al. Simulation of spatial distribution of China potential wetland (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3251–3262, doi: 10.1360/N972015-00358

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00358>

数对湿地空间分布的模拟效果较好。Merot等人^[12]将有效降雨量引入地形指数,提出了气候地形指数(climato-topographic index, CLTI),并将该指数用于欧洲6个气候及地形条件均不同的地区,其研究结果表明该指数可以较好地预测湿地的空间分布且无需进行局部的调整。虽然地形指数对湿地分布有重要影响,但是很少有文献关注地形指数的算法。分布式水文模型从湿地的形成机制入手,依据物理学定律、水文学定律等以及流域产汇流的特性,推导出描述地表径流和地下径流的微分方程组,通过解算微分方程组实现湿地模拟。Fan等人^[13,14]利用不同陆面模式的输出结果,从湿地形成的水文机制入手,构建以地下水位作为湿地模拟主要指标的简单水文框架;通过对水文方程的数值求解,得到空间分辨率为1 km的全球地下水位的分布,以0.25 m作为区分湿地/非湿地的阈值,对全球湿地的潜在分布进行了模拟。朱鹏^[15]利用简化的水循环模型模拟了土壤含水量,根据假设的地形指数和地下水位的的关系,模拟了1 km分辨率的全球湿地适宜区的分布;当以0.25 m作为阈值时,其湿地模拟结果与Fan等人的结果有较好的一致性。基于分布式水文模型的方法虽然在湿地模拟上有坚实的物理基础,但是模型参数获取(如地下水位、土壤物理参数等)及模型求解始终是严重的制约。尤其在进大尺度模拟时,需要对模型做出多种先验性假设,同时空间分辨率难以提高(最优为1 km)。这些都极大限制了模型的精度,无法进一步满足区域尺度的研究要求。

本文采用滤波方法识别真实洼地,并结合气候、降水和蒸发资料,提高了地形特征(气候地形指数)的模拟精度;利用气候地形指数与湿地分布之间的时空关系特征,采用众数统计方法,来模拟中国湿地的潜在分布。该方法依据湿地分布的地理特征原理,不需要分布式物理参数的输入和模型的复杂数值求解运算,具有一定的物理基础,更适于利用高空间分辨率数据进行大尺度模拟。

1 数据源及处理

(i) 气候数据。气候数据用于计算气候地形指数,包括降水和蒸散发数据。降雨数据来自WorldClim,采用1950~2000年的月平均降水数据,通过累加平均计算得到年均降水量。而蒸散发数据来自Montana大学(<http://www.ntsg.umt.edu/project/et>),采用1983~2006

年的全球蒸散发量数据^[16,17]。通过累加平均得到1983~2006年的年均蒸散发量后,利用行政边界得到中国区域部分。年均降水量与年均蒸散发量之差作为中国区域多年年均有效降雨量。虽然这两类数据的时期不完全一致,但用多年平均值而造成的误差可以在容许范围内。

(ii) 中国湿地遥感制图数据。作为湿地分布模拟的样本数据。为与湿地模拟结果类型一致,将遥感制图数据^[18,19]中的湿地合并分为沼泽湿地和水体两类,即把潮间带/浅滩/海滩、滨海沼泽、河口三角洲/沙洲/沙岛、洪泛湿地、内陆沼泽合并为沼泽湿地;其余的10个湿地亚类^[20]合并为水体。然后将类型合并后的4期遥感制图数据进行空间求并,得到近30年水体与湿地的最大分布范围。

(iii) 水文分区数据。除地形外,流域的径流量是决定一个区域湿地发育的关键因子。《中国水文区划》以多年平均径流量为主要指标将全国划分为11个一级分区,以径流的年内分配和径流动态为指标进一步将中国划分为56个二级分区^[21]。考虑径流的年内分配只对湿地的季节分布产生影响,另外也为与多年降水和蒸散发气候资料的相一致,以《中国水文区划》的11个一级分区作为潜在湿地分布模拟的基本单元。

(iv) 其他数据。利用全球六级流域数据和中国行政边界,得到中国范围内共2697个六级流域。将六级流域通过人工目视方式合并为118个三级流域作为气候地形指数计算模拟的基本单元。

全球湖泊与湿地数据库(global lakes and wetland database, GLWD)是在一系列已经存在的全球湿地地图和湿地相关数据资料的基础上汇编而成,数据分为3种尺度(GLWD-1, GLWD-2和GLWD-3),其中GLWD-3数据以分辨率30弧秒(约为1 km)的栅格形式存储了水库、湖泊、河流和不同湿地类型的信息^[22]。在中国区域,湿地类型包括淡水沼泽、洪泛、近海岸湿地、咸水/盐水沼泽、森林沼泽、潮间带以及湿地复合体(Wetland Complex (0%~25% Wetland))等类型。本文将水库、湖泊以及河流合并为水体,将其他湿地类型合并为沼泽湿地。

另外为与模拟结果数据进行对比分析,收集了全国湿地调查数据、全球陆表湿地潜在分区数据以及全球地下水位数据等。这些数据在格式、空间分辨率、地理及投影坐标系均不同,以SRTM数据栅格大小为基准(90 m×90 m);投影统一采用等面积割圆锥

(Albers)双标准纬线投影,地理坐标系采用GCS_WGS_1984坐标系,对这些数据进行了重采样和投影。

2 研究方法

水分是湿地发育的决定性因子,而地形和气候要素是影响水分时空分配的关键因子。CLTI的大小可以反映湿地发育的可能性,其值越大表示该区域越湿润,具有较高发育湿地的可能性,研究表明利用CLTI进行湿地分布模拟具有较好的效果^[12,23]。CLTI的空间分布与湿地的潜在分布具有很好的空间相关性,基于这种关系特征,利用CLTI的图像统计特征,结合湿地分布数据可以进行潜在湿地分布模拟。与分布式水文模型方法进行湿地的模拟相比,该方法可以避免复杂的分布式水文模型的参数获取及其模型复杂的数值求解。与基于统计方法的湿地模拟相比,该方法具有一定的物理基础。其中对湿地模拟精度至关重要的有以下三个方面。

2.1 洼地识别与填洼

地形是控制水分再次分配的关键要素,地形中的洼地是水分汇集之处,更易于发育为湿地,因而洼地的识别对模拟潜在湿地分布至关重要。地形数据中的通常存在两种类型的洼地,即数据本身误差造成的“虚假洼地”和自然存在的真实洼地。“虚假洼地”需要填平,而自然存在的洼地则需要保留。选择合适的洼地识别方法是进行湿地模拟的前提和基础。现有地形指数的计算对此没有给出清晰的方法,很多情况下对这二类洼地不做区分,统一进行填洼处理。这往往使得自然洼地被错误填平,导致地形指数的计算存在误差,从而使得基于地形指数计算的各种相关生态参数存在误差,也必然会降低潜在湿地分布模拟的精度。

将高程差小于某个特定阈值的像元定义为虚假洼地,对此进行填洼处理,而大于该阈值的被认为是自然真实的洼地予以保留是通常地形洼地处理的方法。但由于地形数据的来源不同,各个区域存在地形的差异,因而阈值的确定及其适用范围是一个非常困难的问题,尤其对于区域地形资料获取较为困难的地区或者对大尺度的地形数据处理和模拟而言。

由于地形数据误差带来的“虚假洼地”的分布在空间上随机离散分布,表现为独立随机分布的单个像元,可以理解为数据的噪声;而自然存在的真实洼

地则会在空间上连续分布。因此可以利用滤波的方法去除虚假洼地,保留真实洼地。

本文首先选取东北地区、西藏及鄱阳湖流域3个地形条件、气候、生态均有明显区别的地区作为实验区,对两种洼地识别方法(窗口滤波法和阈值法)进行对比分析,以确定合理的洼地识别方法。

2.2 气候地形指数

降落到地球表面的水分随着蒸发和植物蒸腾作用再次返回大气,因此有效降雨量(即降水量与蒸散发量的差)是作为补给流域、维持土壤水分饱和的有效部分。将这一部分有效降雨量与地形湿度指数^[5,6]相结合,可以更有效地反映气候和地形综合作用对湿地分布的控制作用。气候地形指数^[12]计算公式为

$$CLTI = \log(Vr / \tan\beta), \quad (1)$$

Vr 为流域对局地的水分补给量, $Vr = \text{有效降雨量} \times \text{汇流面积}$; β 为坡度。

2.3 中国潜在湿地分布模拟

水分在重力作用下,受地形控制进行二次分配。理论上湿地的空间分布模式是:CLTI的数值从高到低依次属于水体、沼泽湿地和非湿地。因此通过统计湿地分布(湿地遥感制图)与气候地形湿度指数的空间分布特征,并进行统计特征的匹配,确定这三类地表类型的阈值,就可以实现潜在湿地分布的模拟。众数是在统计分布上具有明显集中趋势点的数值,是样本观测值在频数分布表中频数最多的那一组的组中值,不受极端数据的影响,且求法简便,对大尺度模拟而言,计算简便可行,因此采用众数统计方法。另外流域水量(年均径流量)是决定湿地分布的另一关键因子,因此潜在湿地分布的模拟以水文区划的一级分区为基本单元。在每个基本单元内统计沼泽湿地和水体的CLTI分布特征,得到众数值,以此值为基础结合湿地和水体的面积进行匹配,确定每个分区的沼泽湿地、水体和非湿地的阈值,最终得到潜在湿地分布的空间范围。

3 潜在湿地分布结果

3.1 洼地识别方法

根据SRTM3数据的说明(<http://www.cgiar-csi.org/>),洼地识别的高差取值为16 m。可以看出在3个实验区

(东北地区、西藏地区以及鄱阳湖流域)几乎不存在洼地(图1(a), (c), (e)). 使用窗口滤波方法进行填洼时, 利用 3×3 的窗口对初始识别的洼地进行滤波处理, 得到3个实验区自然洼地分布显著多于阈值法得到的洼地(图1(b), (d), (f)), 尤其是东北地区. 将填洼结果与高程数据进行对比发现, 阈值法导致了真实洼地被填平, 出现了过渡填洼的现象. 如图2所示(图中白色到黑色对应高程值从高到低), 实验区中阈值法将自然洼地填平, 而滤波方法相对较好地保存了自然洼地. 洼地的错误处理, 必然导致流向错误, 影响汇流面积的计算, 从而导致CLTI存在误差, 因此滤波方法可以更合理地进行自然洼地的识别.

3.2 中国潜在湿地分布

以三级流域为单元根据公式(1)分别计算得到每个流域CLTI, 然后利用ArcGIS进行建模, 合并得到

中国区域范围的CLTI分布, 数值范围为[4.19, 25.62] (图S1). 利用1978~2008年4期湿地遥感制图数据所得到的水体与沼泽湿地的最大边界在每个水文区分别对CLTI数据分布进行统计, 确定各个分区CLTI的阈值(表1), 获得不考虑人为影响的中国潜在湿地分布图(图2). 模拟结果表明, 中国潜在湿地分布面积约为 $58.18\times 10^4\text{ km}^2$, 其中沼泽湿地面积约为 $32.50\times 10^4\text{ km}^2$, 水体约为 $25.68\times 10^4\text{ km}^2$. 可以看出, 在丰水地区和多水地区(东南亚热带丰水地区、西南亚热带多水地区和滇西藏东南亚热带丰水地区)的湿地分布面积并不高, 而在平水地区(东北寒温带中温带多水平水地区)和少水地区(华北暖温带平水少水地区、内蒙古中温带少水地区和羌塘高原亚寒带寒带少水地区)的分布却很广, 说明地形是湿地分布的控制因素, 上述丰水和多水地区由于地形起伏较大, 又处于外流区, 不利于湿地的发育. 从行政区看, 潜在湿

图1 洼地识别结果对比. 东北: (a) 阈值, (b) 窗口滤波; 西藏: (c) 阈值, (d) 窗口滤波; 鄱阳湖流域: (e) 阈值, (f) 窗口滤波

Figure 1 Comparison of topographic sinks identified in three regions. (a) and (b) Northeast of China; (c) and (d) Tibet; (e) and (f) Poyang lake catchment

表 1 不同水文分区 CLTI 阈值及模拟湿地面积(单位: 10⁴ km²)
Table 1 The thresholds and simulated wetland area in each hydrological zones (unit: 10⁴ km²)

水文分区	CLTI	水体面积	沼泽湿地面积	总面积
东北寒温带中温带多水平水地区	(9.95,11.10)	2.03	6.00	8.03
华北暖温带平水少水地区	(10.70,11.40)	3.30	4.64	7.94
巴大别北亚热带多水地区	(10.40,10.70)	4.59	1.64	6.23
东南亚热带丰水地区	(10.75,11.00)	2.81	0.78	3.58
西南亚热带热带多水地区	(10.20,10.50)	1.67	0.93	2.60
滇西藏东南亚热带丰水地区	(11.00,11.30)	0.09	0.07	0.16
内蒙古中温带少水地区	(10.30,11.50)	2.10	6.57	8.67
西北山地中温带亚寒带寒带平水少水地区	(10.70,11.30)	1.73	2.66	4.39
西北盆地温带暖温带干涸地区	(10.17,11.40)	1.45	3.16	4.61
青藏高原东部和西南部温带亚寒带平水地区	(11.25,11.80)	2.00	3.85	5.85
羌塘高原亚寒带寒带少水地区	(11.70,11.95)	3.90	2.23	6.13

图 2 中国潜在湿地分布图
Figure 2 China simulated wetlands map

地主要分布在西北部的西藏、新疆及青海地区, 东北部内蒙、黑龙江和吉林地区, 以及华北平原和长江流域.

4 湿地模拟结果对比分析

4.1 面积对比

潜在湿地分布在未考虑人为影响因素情况下, 大于实际湿地的分布是合理的. 本文模拟的潜在湿地和朱鹏^[15]、Fan等人^[13,14]都未考虑人为影响因素, 属于潜在湿地模拟结果, 从总面积看(表2)都大于湿地遥感制图和湿地调查结果. 但是朱鹏^[15]和Fan等人^[13,14]的模拟结果却远高于其余几种数据. 偏大的原因与以下因素有关: 第一, 模拟模型的简化, 为避免复杂的水文和土壤物理参数的获取, 朱鹏^[15]对模型进行了较大程度的简化, 这在一定程度上会影响模型的精度; 第二, 模型分辨率较粗, 模型参数的代表性不够, 虽然这两个研究中模型模拟空间分辨率为1 km, 但与模拟地下水位相关的主要物理参数(如土壤导水率等)的空间分辨率为5分(相当于50 km空间分辨率). 较粗的空间分辨率即使通过降尺度, 也会对受局地微地形影响的地下水模拟产生较大误差. 第三, 模型的适用性受到样点的影响. 朱鹏^[15]和Fan等人^[13,14]的模型是针对全球尺度的湿地和地下水, 其结果依赖于各个区域的样点数据的获取. 由于中国区域仅有146个点位的地下水数据^[14,15], 导致Fan等人^[13,14]的模拟结果在中国区域存在较大偏差. 朱鹏模型中样点数据更多地受到了GLWD数据的影响. 由于GLWD是汇总了不同来源、不同时期的水体和沼泽数据得到, 其中的沼泽部分主要依据全球地表覆盖(GLCC)数据中的永久沼泽形成^[22], 分辨率为1 km.

本文的模拟结果略高于湿地调查、湿地制图以及GLWD-3的结果. 考虑到这几种数据的分辨率不同, 如果统一到相同空间分辨率情况下, 本文模拟结果

与实际湿地分布之间的差异会更大, 但应该在同一个数量级别范围内.

从模拟的水体面积看, GLWD-3数据结果显著偏小. 全国土地利用制图数据结果显示: 中国水体面积在1990年为 $23.79 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2000年 $23.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2005年 $23.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[24]. 该数据制图单元与湿地调查数据基本一致, 应该反映了中国水体在这个尺度上(空间分辨率30 m)的分布情况. 中国湿地遥感制图也是基于同一尺度展开, 但综合到250 m分辨率上后, 水体面积变为 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$. 而根据全球环境遥感监测报告 (http://www.chinageoss.org/gee/2013/lbsy/B1/B1_1/index.html)结果显示, 利用500 m分辨率MODIS数据对中国水体的监测表明, 中国水体面积在 $5.64 \times 10^4 \sim 6.71 \times 10^4 \text{ km}^2$. 一方面说明分辨率对制图结果的影响, 另一方面也表明了中国水体面积的大致区间范围. 本文的模拟结果与湿地调查结果最为接近(表2). 考虑到分辨率的因素, 结果会略微偏大. 但同时考虑到水体的波动性, 该模拟结果应该在合理的区间范围内. 而朱鹏^[15]和Fan等人^[13,14]的结果未给出水体和沼泽湿地的模拟, 无法进行比较.

GLWD-3可视为全球水文和气候模型服务的潜在湿地分布的范围^[22], 在中国区域部分沼泽湿地面积范围在 $20.5 \times 10^4 \sim 35.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ 之间. 本文的模拟结果为 $32.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 高于湿地遥感制图和全国湿地调查结果, 接近GLWD-3的最大湿地面积. 基于遥感的湿地制图和湿地调查数据排除了农业活动对湿地开发的影响, 因此得到的中国潜在湿地的分布会高于湿地调查数据和遥感制图数据; 同时两者之间的差异表示受人类活动最大的区域, 也是潜在湿地恢复的区域.

4.2 空间分布对比

以省(市/自治区)为单元(不包括港澳台地区), 统计模拟的潜在湿地面积与湿地调查等的结果(图3).

表 2 潜在湿地分布模拟统计结果与对比(单位: 10^4 km^2)
Table 2 Comparison of wetlands area among various data sources (unit: 10^4 km^2)

类型	CLTI模拟 (90 m)	遥感制图 (250 m)	湿地调查 (0.08 km ²)	GLWD-3 (1 km)	朱鹏 ^[15] (1 km)	Fan ^[13,14] (1 km)
水体	25.68	16.99	25.91(包括河流、湖泊和人工)	9.73	/	/
沼泽湿地	32.50	20.73	21.73(内陆沼泽湿地)	[20.5,35.59)	/	/
总计	58.18	37.72	47.64	45.32	195.72	163.22

图3 不同数据结果的空间分布对比(CLTI, 本文结果; ZP, 朱鹏结果^[15]; Fan 结果^[13,14]; 单位: 10^4 km^2)
Figure 3 Comparison of simulated wetlands area among different provinces (CLTI; ZP, Zhu^[15]; Fan^[13,14]; unit: 10^4 km^2)

可以看出,除GLWD-3和朱鹏的结果外,其余4种数据的结果在空间分布上较为接近.以行政区为单位,分别对3种模拟结果(本文、朱鹏和Fan的结果)与湿地调查、湿地制图、CLWD-3进行相关统计分析.由图4(a)和(b)看出,本文模拟结果与湿地调查和湿地制图的结果一致性好,线性拟合的 R^2 值分别达到0.88和0.95.而图4(d)和(e)中较低的线性相关性,较大的斜率值表明,朱鹏的模拟结果不仅湿地面积明显偏大,而且其空间分布与中国的实际情况差异较大.图4(g)和(h)则表明,Fan的模拟结果虽然在面积范围上有明显的高估,但是湿地的空间分布格局符合我国的实际情况.与GLWD-3的分析(图4(c), (f), (i))表明,在湿地的空间分布上, GLWD-3数据在中国区域存在较大误差,与湿地实际的空间分布差异较大.因为朱鹏模拟的结果更多地依赖于GLWD的数据^[15],导致这二者之间具有较好的一致性(图4(f)).虽然朱鹏的结果与Fan的结果在湿地总面积上接近,但朱鹏的模拟结果主要集中在西藏,在该区域模拟湿地是Fan结果的2倍多,而GLWD-3的结果也主要集中在西藏(图3).因此总体而言看出本文模拟结果和Fan的模拟结果与无论是湿地调查,还是湿地制图结果在空间上更为一致,

与实际更为接近,好于朱鹏和GLWD-3的结果.

内蒙古自治区位于是内流区,湿地资源丰富,是中国的湿地大省.由图3可知,湿地制图、GLWD-3、本次模拟、朱鹏结果以及Fan的结果在该区域存在一定差异.本次模拟中该地区的湿地面积为 $6.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,略大于湿地调查、湿地制图的结果(分别为 6.02×10^4 和 $5.34 \times 10^4 \text{ km}^2$).Fan的结果明显偏高,为 $18.22 \times 10^4 \text{ km}^2$;而朱鹏和GLWD-3数据则明显偏低,分别为 3.89×10^4 和 $2.62 \times 10^4 \text{ km}^2$.在空间分布上,5种数据空间分布结果在内蒙古东北部有较好的一致性,但是在中西部地区朱鹏的结果相比其他4种数据存在较大差异(图5).朱鹏的结果(图5(c))仅在中部区域集中存在少量湿地,西部和南部基本没有湿地存在.但是由其他4种数据的结果均表明,靠近甘肃和宁夏的区域以及毗邻山西和河北的区域也是湿地分布的主要区域.因此,在局部上看,在面积范围上本次模拟与湿地制图最为接近,而GLWD-3以及Fan的结果明显偏低和偏高,但是空间分布格局这4种结果较为一致;朱鹏的结果不仅空间范围偏小而且空间分布与该区域实际情况差异较大.

对全国坡度数据进行分级:坡度数据在 20° 以下

图4 中国潜在湿地分布的空间对比。(a)~(c) 本文结果与湿地调查、湿地制图、CLWD-3的相关分析;(d)~(f) 朱鹏结果的分析;(g)~(i) Fan结果的分析(单位: 10^4 km^2)

Figure 4 Statistic analysis of simulated China wetland with other data sources. (a)~(c) CLTI to wetlands investigation, wetland mapping and GLWD-3; (d)~(f) Zhu to wetlands investigation, wetland mapping and GLWD-3; (g)~(i) Fan to wetlands investigation, wetland mapping and GLWD-3 (unit: 10^4 km^2)

以 1° 为间隔进行分级, $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间以 5° 为间隔进行分级, 大于 40° 划分为一个等级. 以此为基础, 对除全国湿地调查(仅获得统计数据)外的其他5种数据的湿地面积分别进行统计, 获得湿地在不同坡度级的分布情况(图6(a)). 统计结果表明, 5种数据的整体分布趋势一致性较高, 即湿地主要分布在小于坡度为 5° 的区域, 在 $5^\circ \sim 20^\circ$ 分布减少, $20^\circ \sim 35^\circ$, 湿地面积有所增加. 但是朱鹏和Fan的结果在 $<3^\circ$ 和 $20^\circ \sim 35^\circ$ 区间

有明显的高估, 而本文的模拟结果与GLWD-3和湿地制图结果更为接近. 由于3种潜在分布模拟均没有考虑人为因素的影响, 因此在人类活动频繁的坡度在 5° 以下地区, 模拟面积高于GLWD-3和湿地制图结果.

将高程数据进行分级, 小于海平面0 m的划分为一个等级, $0 \sim 1000 \text{ m}$ 以200 m间隔进行分为5级, $1000 \sim 3000 \text{ m}$ 以500 m为间隔分为4级, 大于 $3000 \sim 6000 \text{ m}$ 以1000 m为间隔分为3级, 大于6000 m的划分

图5 中国潜在湿地分布的局部对比。(a) 湿地制图; (b) 本文结果; (c) 朱鹏结果^[13]; (d) Fan 结果^[13,14]; (e) GLWD-3

Figure 5 Part comparison of simulated wetland of Inner Mongolia for different data sources. (a) Wetlands mapping; (b) CLTI; (c) Zhu^[13]; (d) Fan^[13,14]; (e) GLWD-3

为一个等级. 以此为基础, 对上述5种数据结果分别进行统计, 获得湿地在不同高程的分布情况(图6(b)). 统计结果表明, 5种数据的整体分布趋势基本一致, 即湿地主要分布在高程400 m以下的地区, 1000~1500 m的地区, 以及3000~6000 m的地区, 2000~3000 m内湿地面积最少. 但是在0~200和4000~5000 m高程区间差异最大, 朱鹏结果在400 m以下及4000~6000 m范围内有明显偏高. 本文的模拟结果与湿地制图的结果最为接近, 与Fan结果除0~200 m区间外,

趋势基本一致. 除5000~6000 m区间外, 与GLWD-3结果也较为一致.

5 结论

通过改进传统地形指数计算中地形洼地识别方法, 结合近50年的降水和蒸散发资料, 利用气候地形指数, 根据气候地形指数的空间分布与湿地的分布具有很好的空间相关性特征, 通过特征值的匹配模拟了不考虑人类影响下的中国潜在湿地分布. 结果表明:

图6 (a) 湿地面积坡度分布以及(b)不同高程分布的湿地面积分布(Mapped, 湿地制图; CLTI, 本文结果; ZP, 朱鹏结果^[15]; Fan, Fan 结果^[13,14])
Figure 6 (a) Wetland area distribution on slope for different data sources; (b) wetlands area distributions on elevation for different data sources (Mapped, wetlands investigation; CLTI; ZP, Zhu^[15]; Fan^[13,14])

(1) 窗口滤波法是较为合理有效的洼地识别方法。基于图像统计模拟结果表明中国潜在湿地约为 $58.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中沼泽湿地面积约为 $32.50 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水体约为 $25.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。主要分布在东北平原、青藏高原、华北平原、长江流域及东南沿海地区, 黑龙江、西藏、内蒙古、青海、新疆、吉林、江苏等。

(2) 与湿地制图、湿地调查、GLWD-3、Fan模拟结果及朱鹏模拟结果的相比: 本文的模拟结果与湿地制图和湿地调查结果无论是在空间范围还是空间分布格局都有较高的一致性, 较已有模拟结果无论是在空间分辨率还是模拟精度上都所提高; Fan的模拟结果虽然在面积范围上有明显的偏高, 但是其模拟的湿地的空间分布格局与湿地调查和湿地制图的结果较为一致; 朱鹏的模拟结果无论是在面积范围还是空间分布格局上都与我国的实际情况差异较大; GLWD-3数据的空间分布与中国湿地的实际分布情况有较大的差别, 故在使用GLWD-3数据时需要根据研究内容和精度要求进一步考虑其在中国区域的适

宜性。

(3) 本文的方法, 不仅回避了单纯使用一种方法存在的局限性, 具有一定的物理基础同时避免了复杂的分布式水文模型的方程求解以及分布式模型参数的获取, 方法简便易行, 便于利用更高分辨率数据的大尺度模拟。而且模拟结果空间分辨率高, 符合我国湿地的分布规律, 可为我国湿地制图、制定湿地保护、湿地恢复政策提供科学依据。

提高地形相关指数的模拟精度是提高潜在湿地分布的重要条件。在未来工作中, 需要在以下方面进行改善。(1) 考虑到中国全境地形数据的计算效率, 本文所使用的流向算法是单流向法。该算法是最为广泛的算法, 但这种算法在45°或其倍数的方向上往往产生平行径流, 形成与实际情况不相符的误差。多流向法可以较好解决单流向法的问题^[25]。(2) 土壤的物理属性对于水分的再分配也具有重要影响, 但是由于土壤水分运移的复杂性以及缺少全国尺度的土壤导水率的相关数据, 本文的计算暂时没有考虑土壤物理性质的影响。(3) 蒸散发数据是影响CLTI计算精度的

一个重要变量, 本文由于在计算时并未获得中国区域长时间序列的模拟蒸散发数据, 故使用美国所提供的全球的蒸散发数据, 这一数据相对精度较低。故在进

行数据更新时, 将采用中国区域的模拟蒸散发数据。
(4) 综合考虑气候和人为因素(尤其是耕地)对湿地的影响, 开展湿地分布及变化规律模拟等的相关研究。

致谢 编辑和审稿专家对本文提出了中肯而富有建设性的修改意见, 美国南达科达州立大学Carol Johnston教授对英文摘要进行了润色, 一并表示衷心感谢。

参考文献

- Costanza R, D'Arge R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253–260
- Zhu P, Gong P. Suitability mapping of global wetland areas and validation with remotely sensed data. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 2283–2292 [朱鹏, 宫鹏. 全球陆表湿地潜在分布区制图及遥感验证. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 1610–1620]
- Ling C X, Ju H B, Zhang H Q, et al. Study on the forecast of wetland resources changes in Beijing based on CA-MARKOV model (in Chinese). *Chin Agr Sci Bull*, 2012, 28: 262–269 [凌成星, 鞠洪波, 张怀清, 等. 基于CA-MARKOV模型的北京湿地资源变化预测研究. *中国农学通报*, 2012, 28: 262–269]
- Zhou H, Bu R C, Hu Y M, et al. Correlations between potential distribution of wetlands in Great Hing'an Mountains and environment variables (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2007, 26: 1533–1541 [周昊, 布仁仓, 胡远满, 等. 大兴安岭湿地潜在分布与环境因子的相关性. *生态学杂志*, 2007, 26: 1533–1541]
- Zhang Q. Dynamic simulation and prediction of wetland landscape pattern based on CA-Markov model in southern Hangzhou bay area (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. 1–71 [张茜. 基于CA-Markov模型的杭州湾南岸湿地景观格局动态模拟与预测. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2013. 1–71]
- Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull*, 1979, 24: 43–69
- Barling R D, Moore I D, Grayson R B. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resour Res*, 1994, 30: 1028–1044
- Roberta I, Salvatore F, Stefania P, et al. Testing different topographic indexes to predict wetlands distribution. *Proc Environ Sci*, 2013, 19: 733–746
- Rodhe A, Seibert J. Wetland occurrence in relation to topography: A test of topographic indices as moisture indicators. *Agr Forest Meteorol*, 1999, 98–99: 325–340
- Deng H P, Li X B. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMEDEL (in Chinese). *Prog Geogr*, 2002, 21: 103–110 [邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析. *地理科学进展*, 2002, 21: 103–110]
- Zhang C X, Yang Q K, Li R. Advancement in topographic wetness index and its application (in Chinese). *Prog Geogr*, 2005, 24: 116–123 [张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于DEM的地形湿地指数及其应用研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24: 116–123]
- Merot P H, Squitand H, Auroousseau P, et al. Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecol Mod*, 2003, 163: 51–71
- Fan Y, Miguez-Macho G. A simple hydrologic framework for simulating wetlands in climate and earth system models. *Clim Dyn*, 2011, 37: 253–278
- Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 2013, 339: 940–943
- Zhu P. Global land surface wetland suitability mapping and spatial-temporal analysis of global wetland dynamic (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014. 1–84 [朱鹏. 全球陆表湿地潜在分布区制图及湿地变化分析. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014. 1–84]
- Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983–2006. *Water Resour Res*, 2010, 46: W09522
- Zhang, K, Kimball J S, Mu Q, et al. Running. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005. *J Hydrol*, 2009, 379: 92–110
- Niu Z G, Gong P, Cheng X, et al. Geographical characteristics of China's wetlands derived from remotely sensed data. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 723–738 [牛振国, 宫鹏, 程晓, 等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39: 188–203]
- Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, et al. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2813–2823 [牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978–2008年中国湿地类型变化. *科学通报*, 2012, 57: 1400–1411]

- 20 Gong P, Niu Z G, Cheng X, et al. China's wetland change (1990–2000) determined by remote sensing. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1036–1042 [宫鹏, 牛振国, 程晓, 等. 中国1990和2000基准年湿地变化遥感. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 768–775]
- 21 Xiong Y, Zhang J Z, et al. *China Hydrological Regionalization* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1995 [熊怡, 张家桢, 等. *中国水文区划*. 北京: 科学出版社, 1995]
- 22 Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J Hydrol*, 2004, 296: 1–22
- 23 Cress J J, Roger S, Comer P, et al. Terrestrial ecosystems—Topographic moisture potential of the conterminous united states. In: *Scientific Investigations Map 3086*. Washington DC: US Geological Survey Scientific Investigations. 2009
- 24 Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century (in Chinese). *J Geogr Sci*, 2009, 64: 1411–1420 [刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪处中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. *地理学报*, 2009, 64: 1411–1420]
- 25 Lian P, Rampi J, Knight F, et al. Comparison of flow direction algorithms in the application of the CTI for mapping wetlands in Minnesota. *Wetlands*, 2014, 34: 513–525

Simulation of spatial distribution of China potential wetland

HU ShengJie^{1,2}, NIU ZhenGuo¹, ZHANG HaiYing¹, CHEN YanFen^{1,2} & GONG Ning¹

¹ State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Knowing the spatial distribution of potential wetlands is vital for improving wetland mapping accuracy, understanding the spatial evolution of wetlands, and making policies for wetland conservation and restoration. Topographic characteristics are key factors for wetland distribution. We first separated natural sinks from false sinks in DEM data by using window filtering, which proved to be more accurate than threshold approaches. We then developed the China CLTI (climato-topographic index) by combining the past 50 years' average precipitation and evaporation data in China. A statistical method which was based on the relationship of wetland spatial distribution and CLTI distribution, was used to simulate the spatial distribution of China potential wetlands, and proved to be efficient and practical. This approach was simpler than approaches requiring the parameterization and solution of complicated hydrological models. The maximum distribution of Chinese wetlands, which was developed based on the union of four Chinese wetland maps (1978, 1990, 2000 and 2008), was input as the model main parameter. The distribution of simulated Chinese potential wetlands is consistent with the investigation of Chinese wetlands. Compared with previous studies, our simulated potential wetland spatial distribution has finer spatial resolution and high accuracy. According to the simulation, there are potentially about 325000 square kilometers of marshes and 256800 square kilometers of water bodies in China, mainly distributed in the northwest (mainly in Tibet, Qinghai, and Xinjiang), northeast (mainly in Inner Mongolia, Heilongjiang and Jilin), the North China Plain and the Yangtze River Basin. This research laid a foundation for modeling wetlands changes across China by using dynamic climatic variables and land cover and land use.

Climato-Topographic Index, sink identification, potential wetland distribution, China

doi: 10.1360/N972015-00358

补充材料

图 S1 中国气候地形指数分布

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.