

长吉图地区土壤保持服务功能时空变化与供需匹配

青仕嘉, 李红, 尹婧博

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: [目的] 依据长吉图地区土壤保持服务功能时空变化及其供需匹配特征, 辨别区域内不同土壤修复治理需求, 为推进区域土壤生态环境保护有效落实提供科学依据。[方法] 利用 InVEST 模型, 定量评估 2000、2010、2020 年 3 期长吉图地区各地市、县区的土壤保持服务功能, 分析土壤保持服务供需及其时空变化匹配状态关系, 以识别亟需采取针对性管理的优先区域并制定土壤整治策略。[结果] 2000—2020 年长吉图土壤保持强度为 $0.00 \sim 2\,590.42 \text{ t/km}^2$, 减少侵蚀服务功能为 $0.00 \sim 1\,544.23 \text{ t/km}^2$, 泥沙持留服务功能为 $0.00 \sim 2\,452.20 \text{ t/km}^2$, 区域间土壤保持服务水平差异显著, 具有明显的时空分异特征; 研究区供需匹配情况较平衡, 未出现低供给高需求匹配类型; 区域土壤保持服务供需变化匹配关系包括供需同增/供需同减/供需同减/供减需增不可持续 4 种类型。亟需治理的不可持续区域比例逐年扩大, 截至 2020 年分别为 68.15% (减少侵蚀), 72.57% (泥沙持留), 集中于研究区东侧以及西侧的中间部分, 土壤保持服务弱化显著。[结论] 长吉图地区土壤保持服务功能空间差异明显。确定长吉图地区中东部、东部尾端与西部区域为土壤敏感区、土壤脆弱区、土壤修复区, 其土壤生态管理工作应分别以土壤整治、土壤保育、土壤修复为主。

关键词: 土壤保持功能; 生态系统服务功能; 供需匹配; InVEST 模型; 长吉图地区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)01-0181-12

中图分类号: S157

文献参数: 青仕嘉, 李红, 尹婧博. 长吉图地区土壤保持服务功能时空变化与供需匹配[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 181-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.019; Qing Shijia, Li Hong, Yin Jingbo. Spatio-temporal variations of soil conservation service function and matching of supply and demand in Changchun-Jilin-Tumen region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 181-192.

Spatio-temporal Variations of Soil Conservation Service Function and Matching of Supply and Demand in Changchun-Jilin-Tumen Region

Qing Shijia, Li Hong, Yin Jingbo

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China)

Abstract: [Objective] Different soil remediation treatment needs in the Changchun-Jilin-Tumen region were determined and the characteristics of supply and demand were matched based on the spatio-temporal variations of soil conservation service function in the region in order to provide a scientific basis for promoting the effective implementation of regional soil ecological protection. [Methods] The InVEST model was used to quantitatively assess the soil conservation service functions of cities and counties in the Changchun-Jilin-Tumen region in 2000, 2010, 2020. The relationship between the supply and demand of soil conservation services and their spatial and temporal changes were analyzed in order to identify the priority areas in need of targeted management and to formulate soil remediation strategies. [Results] From 2000 to 2020, the soil conservation intensity of the Changchun-Jilin-Tumen region ranged from 0.00 to $2\,590.42 \text{ t/km}^2$; the erosion reduction service function ranged from 0.00 to $1\,544.23 \text{ t/km}^2$, and the sediment retention service function ranged from 0.00 to $2\,452.20 \text{ t/km}^2$, with significant differences in soil conservation service levels between regions and obvious spatial and temporal differentiation characteristics. The supply and demand

收稿日期: 2023-05-21

修回日期: 2023-08-07

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黑土城乡交错区土地利用变化的耕地功能识别: 基于土壤地球化学视角”(42071255); 吉林省哲学社会科学智库基金项目“吉林省耕地后备资源开发时序研究”(2023JLSKZKZB066); 吉林大学东北振兴发展专项研究课题“吉林省耕地非粮化的时空分异及影响机理研究”(23dbzx10)

第一作者: 青仕嘉(1999—), 女(汉族), 湖南省常德市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务与可持续发展。Email: qingsj21@mails.jlu.edu.cn.

通信作者: 李红(1979—), 女(汉族), 吉林省白城市人, 博士, 教授, 从事城乡土地资源可持续利用方面的研究。Email: h_li@mails.jlu.edu.cn.

matching situation in the study area was relatively balanced, and there was no low supply and high demand matching type. There were four matching types between supply and demand of regional soil conservation services: Soil conservation services were sustainable when supply and demand increased simultaneously and when supply increased and demand decreased; Soil conservation services were not sustainable when both supply and demand decreased and demand increased while supply decreased. The proportion of unsustainable areas in need of treatment increased over time, accounting for 68.15% (erosion reduction) and 72.57% (sediment retention) by 2020, concentrated in the east and west parts of the study area. In the middle part of the study area, the soil retention service was significantly weakened. [Conclusion] In the study area, the spatio-temporal variations in soil conservation service founction were obvious, and the central-eastern part, eastern tail end, and western part of the Changchun-Jilin-Tumen region were identified as the soil sensitive area, soil fragile area, and soil restoration area, respectively. Soil ecological management work in these areas should focus on soil remediation, soil conservation, and soil restoration, respectively.

Keywords: soil conservation function; ecosystem service founction; matching supply and demand; InVEST model; Changchun-Jilin-Tumen region

人口增长及快速城市化背景下,自然生态系统被快速改变^[1],一些自然系统已达到稳定(健康)的关键生物物理阈值^[2],超过 60%的生态系统服务正在衰退并危及人类未来福祉^[3]。由于生态系统中存在巨大不确定,可能无法精准量化土壤保持服务价值,认为量化土壤保持服务并不是目的,生态系统服务供需不匹配,包括生态系统服务供应(如水土涵养能力)下降和对生态系统服务需求(如农业地区营养负荷)增长^[4],是生态系统退化的直接原因。将生态系统服务供需平衡评估结果纳入决策管理过程,在维持生态系统稳定的同时,尽可能提升人类福祉,才是生态系统服务研究的落脚点^[5-6]。

土壤侵蚀是人类面临的最普遍的环境问题之一,其危害性与持续性远超其他类型灾害^[7-8],不仅导致土壤退化、土地生产力降低,影响农业生产与粮食安全,还与径流泥沙搬运等过程相互作用,对污染物质与土壤有机碳的横向移动产生影响,进而对其他区域的生态、环境、人类生存和社会经济发展带来严重影响^[9-10]。土壤保持服务是指生态系统为防止土壤流失的侵蚀调控能力与对泥沙的储积保持能力^[11-12]。众多学者广泛利用 RUSLE(revised universal soil loss equation)模型进行土壤保持服务评估,其原理是基于土壤侵蚀视角,通过计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值以作为衡量指标^[13-14]。但该模型未考虑横向的泥沙搬运活动,忽略了地块拦截上游沉积物的能力,导致土壤保持量估算上存在一定误差。而 InVEST(integrated valuation of ecosystem servicesand tradeoffs)模型则将泥沙持留量纳入土壤保持服务范畴,并基于多时段遥感数据、借助 ArcGIS 平台,能有效研究土壤保持功能的时空演变^[15]。

长吉图地区处于社会经济转型升级的关键阶段,

平衡社会经济发展与生态系统保护之间的关系,是该区域面临的重大挑战。同时,由于长期不合理耕作与严重水土流失,存在土壤侵蚀严重、黑土层变薄,土壤有机质下降,部分土壤出现盐化、碱化与酸化等土壤退化问题^[16],亟需开辟以优化土壤保持服务供需匹配、增强土壤保持服务为基础的区域可持续发展之路。本研究利用 InVEST 模型,在定量估算 2000, 2010,2020 年长吉图地区土壤保持服务基础上,分析不同时期土壤保持服务的供给与需求状况,探究研究区土壤保持服务供需时空演变及供需匹配特征,识别土壤生态管控区,为提升长吉图地区土壤保持能力,实施土壤保护、维护土壤生态安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长吉图地区位于东经 124°30′47″—131°19′29″,北纬 42°00′02″—44°56′46″,包括吉林省范围内的长春市部分区域(长春市城区、德惠市和农安县)、吉林市部分区域(吉林市城区、蛟河市和永吉县)与延边朝鲜族自治州全境(包括图市,见图 1),2020 年区域总面积为 7.32×10^4 km²,占吉林省面积的 39.1%,其中建设用地面积所占比例为 4.35%,林地所占比例为 64.76%。长吉图属于温带大陆性季风气候,雨热同季,季节变化明显,多年平均气温为 2~6℃,年均降水量为 400~600 mm,多集中在夏季。土壤类型主要包括暗棕壤、黑土、白浆土与草甸土等。区域内水系发达,地势东南高西北低。全区自东向西山岭、盆地以东北向为主平行排列,西部多为平原,农业开发程度大,东部山地分为长白山中山低山区和低山丘陵区,地形起伏较大。

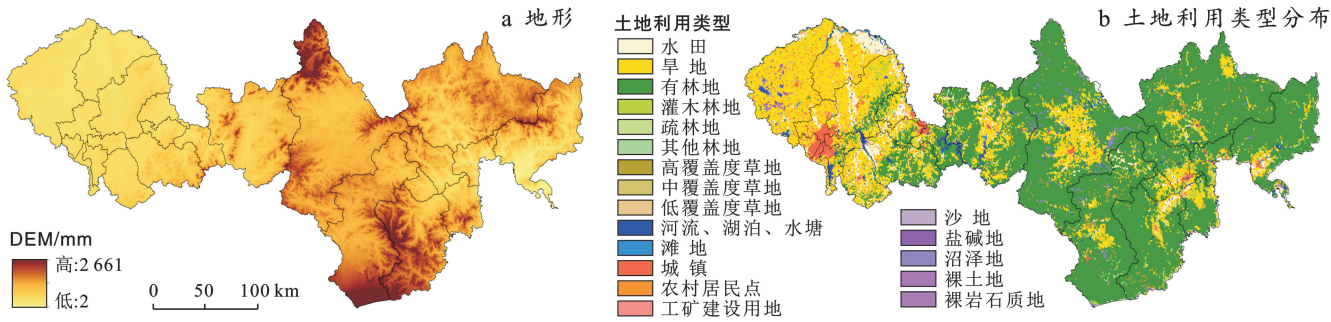


图1 2020年长吉图地区地形与土地利用覆被

Fig.1 DEM and land use cover of Changchun-Jilin-Tumen region in 2020

1.2 数据来源

所用数据主要有: ①数字高程模型(DEM)数据, 来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>), 分辨率为30 m; ②2000—2020年降水量、蒸发量等气象数据, 来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>); ③2000, 2010与2020年土地利用数据, 来源中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>); ④2000, 2010与2020年归一化植被指数(NDVI)数据, 来源于国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>); ⑤土壤性质数据来源世界土壤数据库(<https://www.fao.org>)。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤保持服务评估模型 土壤保持服务是潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值, 再加上地块上植被减缓地表径流侵蚀和拦截上坡沉积物量的总和^[12,17]。本文采用InVEST中的SDR模型, 基于研究区的气象、DEM、土地利用与土壤相关数据, 计算潜在与实际土壤侵蚀量、泥沙持流量, 并利用ArcGIS平台空间分析模块进行计算分析, 从而计算得到研究区土壤保持量模数(t/km^2)。一方面基于土壤流失角度, 以减少侵蚀量(潜在土壤侵蚀量与实际侵蚀量的差值)体现植被对减少土壤侵蚀的贡献; 另一方面基于整体流域角度, 以泥沙持流量(泥沙淤积与泥沙流失量的差值)识别区域捕获/保留沉积物的能力, 以体现植被对避免土壤侵蚀的贡献, 即泥沙持流量。计算公式为:

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp \left[-0.0256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left\{ 1 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (6)$$

$$K = (-0.01383 + 0.51575 \cdot K_{EPIC}) \times 0.1317 \quad (7)$$

式中: K_{EPIC} 为美制单位的土壤侵蚀力因子 [$t \cdot km^2 \cdot h / (km^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; m_s 为砂粒含量(%); m_{silt} 为粉

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i \quad (1)$$

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times P_i \times C_i \quad (2)$$

$$SEDR_i = SDR_i \times \sum_{j=1}^{i-1} USLE_j \times \prod_{z=j+1}^{i-1} (1 - SDR_z) \quad (3)$$

$$SC_i = RKLS_i - USLE_i + SEDR_i \quad (4)$$

式中: $RKLS_i$ 是基于地貌、气候条件下栅格 i 的潜在土壤侵蚀量 (t/km^2); $USLE_i$ 与 $USLE_j$ 分别是考虑土壤保持工程、植被管理等措施后栅格 i 与该上坡栅格 j 的实际土壤侵蚀量 (t/km^2); $SEDR_i$ 与 SC_i 分别是栅格 i 的泥沙持流量 (t/km^2)、土壤保持量 (t/km^2); R_i 是栅格 i 的降水侵蚀因子 [$MJ \cdot mm / (km^2 \cdot h \cdot a)$]; K_i 是栅格 i 的土壤可蚀性因子 [$t \cdot km^2 \cdot a / (km^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; LS_i 是栅格 i 的坡长坡度因子(无量纲); P_i 是栅格 i 的植被覆盖因子(无量纲); C_i 是栅格 i 的土壤保持措施因子(无量纲); SDR_i 为栅格 i 的持留率; SSR_i 为上坡栅格单元的泥沙持流量 [$t / (km^2 \cdot a)$]。具体指标计算过程为:

(1) 降水侵蚀因子(R), 是降雨因素对土壤剥离、搬运及地表冲刷能力大小的体现, 能反映由降水引起的潜在土壤侵蚀与流失能力。本文依据章文波等^[18]构建的逐月雨量模型估算侵蚀力, 计算公式为:

$$R = 0.1833 \times \left[\left(\sum_{i=1}^{12} P_i^2 \right) \times \left(\sum_{i=1}^{12} P_i \right)^{-1} \right]^{1.9957} \quad (5)$$

式中: N 为年数; P_i 为第 i 月的降水量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K), 用于反映土壤对侵蚀作用的敏感程度。本文采取 Williams 等提出的侵蚀—生产力影响评价模型计算得出, 计算公式为:

粒含量(%); m_c 为黏粒含量(%); C 为表层土壤有机碳的含量(%); K 为国际制单位的土壤侵蚀力因子 [$t \cdot km^2 \cdot h / (km^2 \cdot MJ \cdot mm)$]。

(3) 坡长坡度因子(LS),是基于实际地形条件,以反映坡长(L)、坡度(S)对形成土壤侵蚀风险的能力大小。基于魏健美等^[19]提供的计算方法得出,计算公式如下:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (8)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta < 0.57^\circ) \\ 0.3 & (0.57^\circ \leq \theta < 1.72^\circ) \\ 0.4 & (1.72^\circ \leq \theta < 2.56^\circ) \\ 0.5 & (\theta \geq 2.56^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ 为坡长; θ 为坡度; m 为坡长指数。

(4) 土壤保持措施因子(P),是指在采取水土保持措施或未采取任何管理措施下,土壤流失量的比值,范围为 0~1,值越大代表的水土保持效果越差。参考高青峰等^[20]的研究成果,基于长吉图地区土地利用类型进行赋值,即耕地为 0.25;林地 0.50;草地为 0.20;水域为 0.00;建设用地与未利用地皆为 1.00。

(5) 植被覆盖因子(C),指下垫面的植被覆盖对土壤侵蚀的影响,植被覆盖度越高,土壤侵蚀越小,范围为 0~1,用于反映植被覆盖与土地利用等因素对土壤侵蚀的综合作用。研究基于土地利用类型、NDVI 指数计算植被覆盖度,并根据蔡崇法等^[21]建立的植被盖度与植被覆盖因子之间的关系公式进行计算,计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (11)$$

$$C = \begin{cases} 1 & (FVC = 0) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg(FVC) & (0 < FVC < 78.3\%) \\ 0 & (FVC \geq 78.3\%) \end{cases} \quad (12)$$

式中:FVC 为植被覆盖度(无量纲); NDVI 为归一化植被指数(无量纲)。

1.3.2 土壤保持服务供需匹配分析 土壤侵蚀减少量与泥沙持流量,可用于识别景观中捕获/保留沉积物的区域。实际上,土壤侵蚀减少量或泥沙持流量的高值区,也是实际侵蚀或泥沙流失量越多的区域,仅专注于保护土壤保持服务功能优质区域并不一定首先解决产生土壤侵蚀、土壤退化问题,所以,要判断土壤保持服务供需匹配状态,再依据长吉图地区土壤保持服务供需匹配关系状态,识别研究区的土壤重点恢复与保护区,为提高土壤保持服务能力提供依据。首

先将“土壤减少侵蚀量—土壤实际侵蚀量”“泥沙持留量—泥沙流失量”作为两组土壤保持服务供需关系组,构建直角坐标系,X 轴为土壤保持服务供给量,即减少侵蚀/泥沙持留量,Y 轴为土壤保持服务需求量,即实际侵蚀/泥沙流失量;其次依据供需量平均值将土壤保持服务状况划分为 4 种类型,即“高供给—高需求(HH)”“低供给—高需求(LH)”“低供给—低需求(LL)”和“高供给—低需求(HL)”(图 2a),用来识别三期时间截面的土壤保持服务供需匹配关系;利用供需变化强度指数,基于每十年供需量的变化趋势来识别土壤保持服务供需变化的匹配趋势,计算公式为:

$$\Delta SCS = \frac{SCS_b - SCS_a}{SCS_a} \quad (13)$$

$$\Delta SCD = \frac{SCD_b - SCD_a}{SCD_a} \quad (14)$$

式中: ΔSCS 和 ΔSCD 分别表示土壤保持服务供给量和需求量的变化强度; SCS_a 和 SCS_b 分别表示时点 a 和 b 的土壤保持服务供给量(t/km^2); SCD_a 和 SCD_b 分别表示时点 a 和 b 的土壤保持服务需求量(t/km^2)。以“SCS-SCD”为“X—Y”轴,基于 ΔSCS 与 ΔSCD 和的正负号建立直角坐标系,以第一象限顺时针进行分类,得到供增需增、供增需减、供减需减、供减需增 4 种土壤保持服务供需动态匹配类型后,根据 ΔSCS 与 ΔSCD 差值的正负性,划分服务变化是否可持续,差值为正则可持续型,反之则为不可持续型(图 2b)。

2 结果与分析

2.1 土壤保持服务时空分布特征

2.1.1 土壤保持服务功能分析

(1) 减少侵蚀能力。由图 3 可知,空间分布上,2000—2020 年长吉图地区减少侵蚀服务功能分布格局较为稳定,主要关系为东部强于西部,南北两侧强于中部。具体来说,减少侵蚀服务高值集中区分布在珲春市中部、和龙市西部、敦化市北部,以及蛟河市与丰满区交界处。

整体上呈现研究区西部多为减少侵蚀服务功能优化区,研究区东部多为减少侵蚀服务功能减弱区;时间变化上,减少侵蚀服务功能变化时空分布差异显著,前 10 a 减少侵蚀服务功能优化区域集中在区域中南部,减弱区域集中在区域东部,变化极值分别为 793.42, -751.27 t/km^2 ,而后 10 a 则与前 10 a 空间变化属性情况恰好相反,变化极值分别为 440.31, -1 033.95 t/km^2 ,功能退化态势愈加明显。总体上服务功能呈现先提升后下降趋势,其模数最高值由

2000 年的 $1\,270.77\text{ t/km}^2$ 提升为 2010 年的 $1\,544.23\text{ t/km}^2$, 后减少为 959.96 t/km^2 , 虽然服务功能弱化

强度随时间逐渐降低, 但其减弱态势不容忽视, 亟需构建更有效的土壤保护措施。

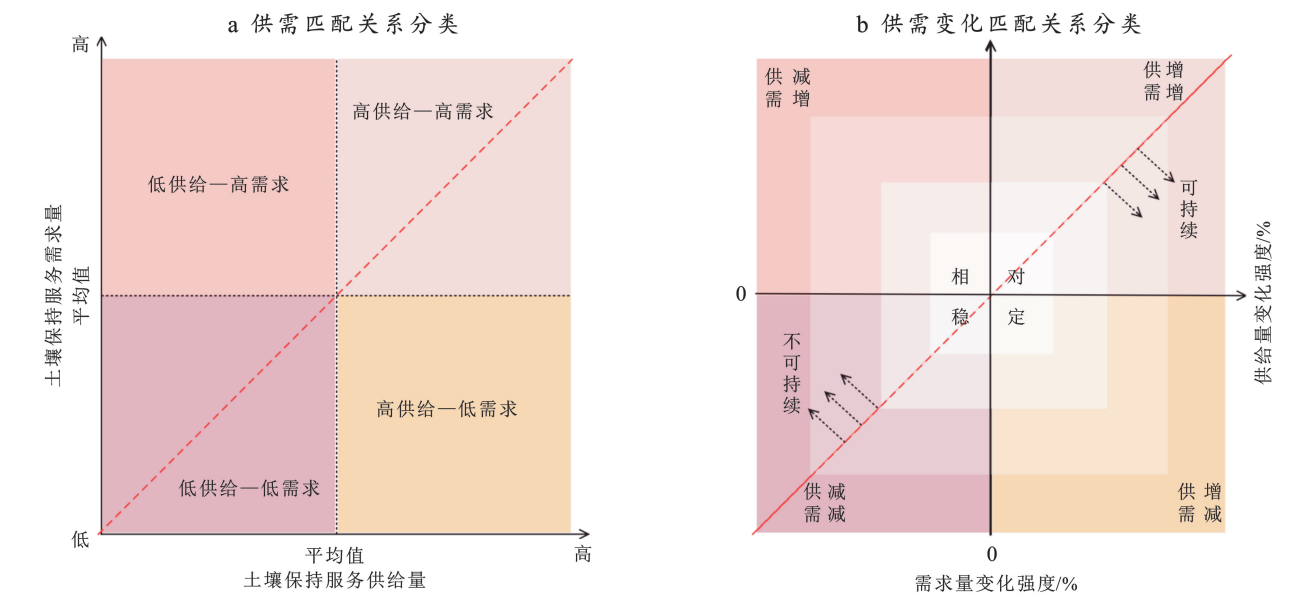


图 2 土壤保持服务供需匹配关系分类

Fig.2 Classification of supply-demand matching relationship for soil conservation services

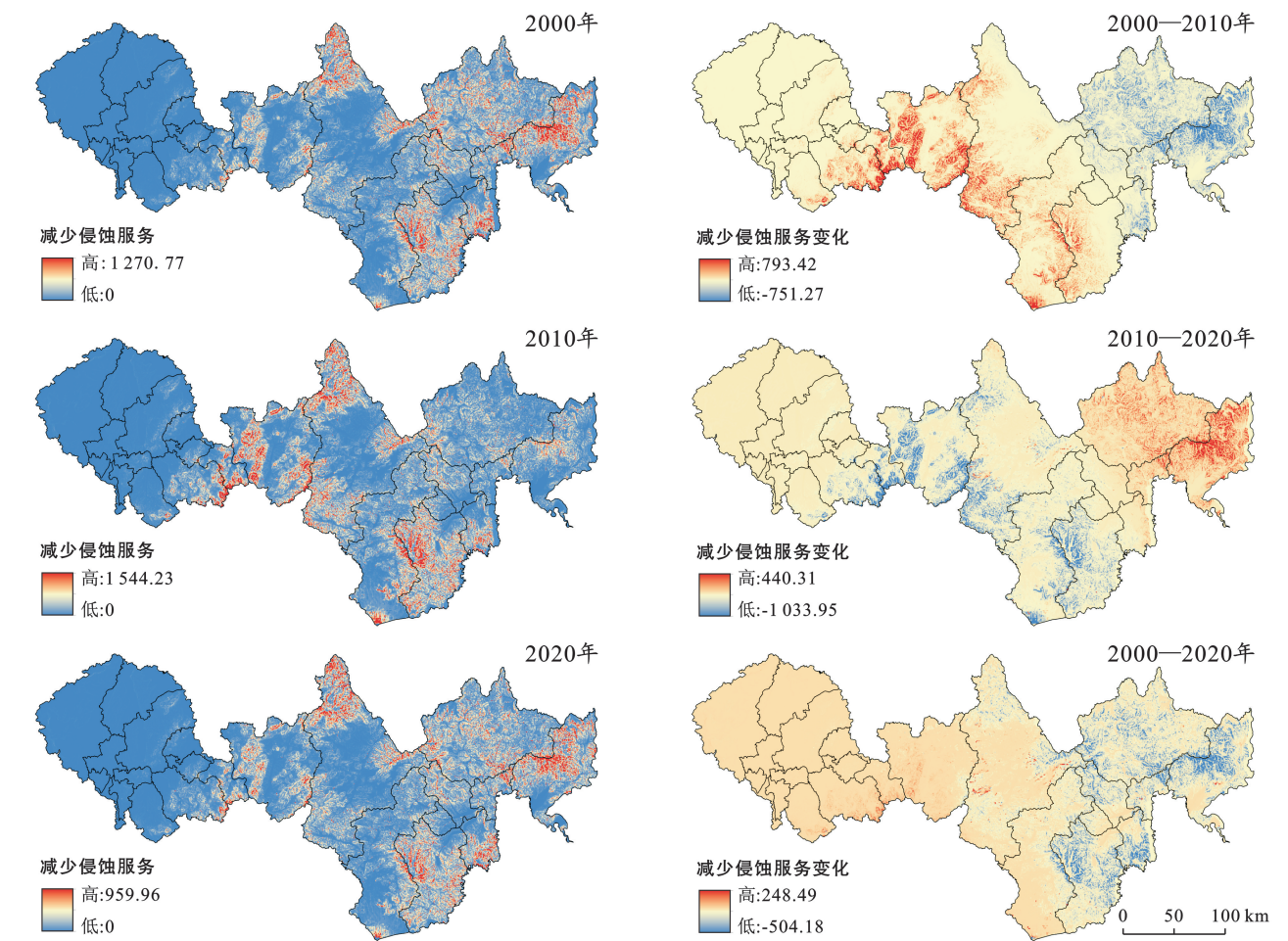


图 3 2000—2020 年长吉图地区减少侵蚀服务功能时空分布

Fig.3 Spatio-temporal variations of service erosion reduction functions of Changchun-Jilin-Tumen region from 2000 to 2020

(2) 泥沙持留能力。由图 4 可知,空间分布上,泥沙持留服务多沿长吉图区域内所覆盖的松花江水系、图们江水系、绥芬河水系及其各支流分布,服务高值区集中在研究区中东部,即松花江水系的牡丹江、古洞河、鳌龙河支流区域;图们江水系的布尔哈通河、嘎呀河及其左岸支流大汪清河与桦皮甸子河、密江河、海兰河、珲春河流域。时间变化上,泥沙持留量虽在总量上呈现先增加后减少趋势,由 2.84×10^6 t 增

至 3.00×10^6 t 后降至 2.14×10^6 t,但服务功能存在持续弱化趋势,一方面 20 a 间服务模数的极大值由 $2\,452.20\text{ t/km}^2$,下降为 $2\,422.96\text{ t/km}^2$,再降至 $2\,058.48\text{ t/km}^2$;另一方面,泥沙持留服务变化模数中减少值的绝对值均大于增加值,且每 10 a 间极值间的差值逐渐增大,由 $2\,589.26\text{ t/km}^2$ 扩大至 $3\,210.30\text{ t/km}^2$ 。其服务功能性减弱趋势愈加凸显研究区各流域水土保持工作的重要性与紧迫性。

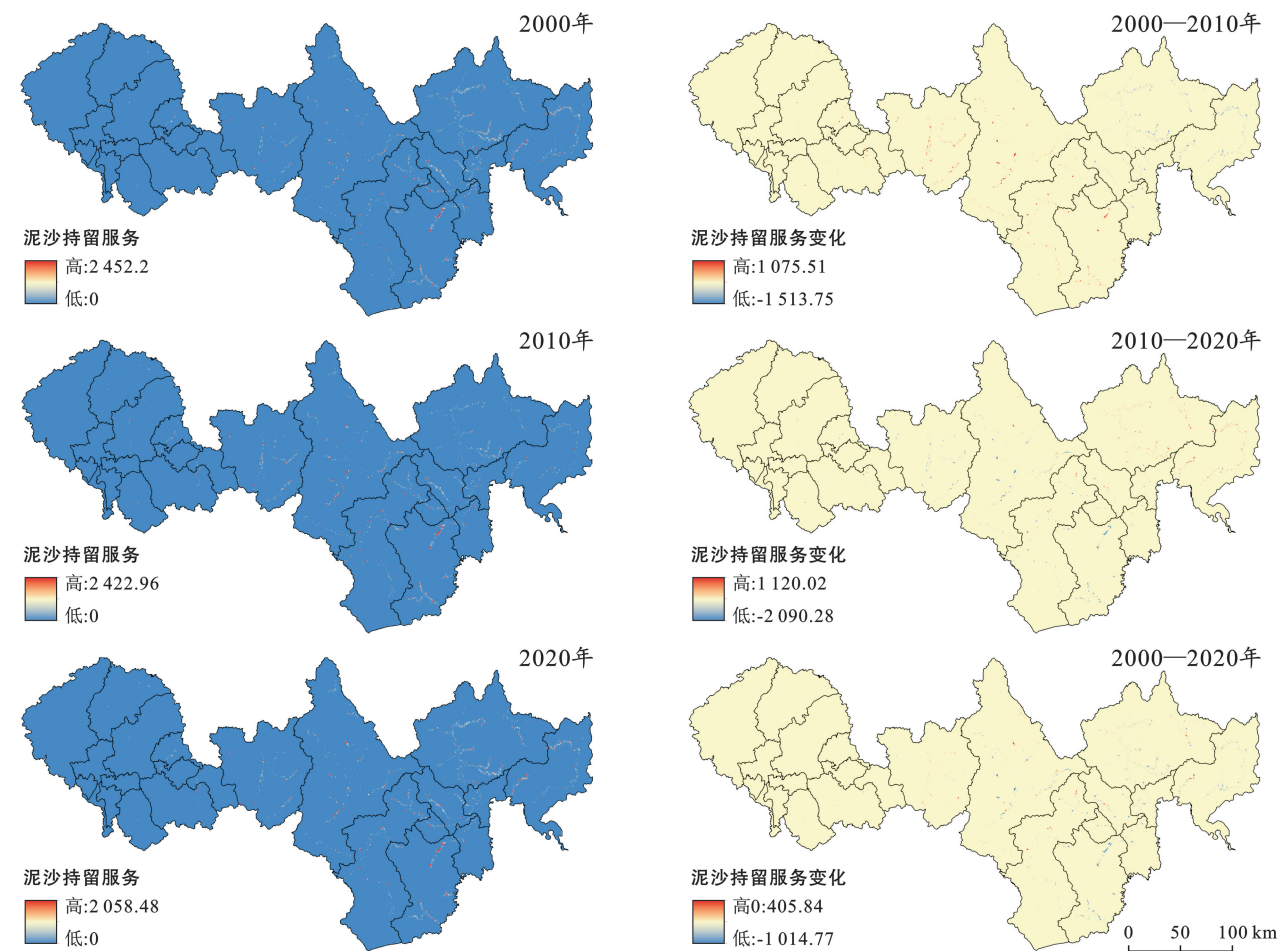


图 4 2000—2020 年长吉图地区泥沙持留服务功能时空分布

Fig.4 Spatio-temporal variations of sediment-holding service functions of Changchun-Jilin-Tumen region from 2000 to 2020

2.1.2 土壤保持服务功能分析 借助 ArcGIS 平台 Spatial Analysis 模块进行计算,得到研究区土壤保持量模数时空变化分布情况(图 5),并导出 2000—2020 年研究区各地市、县区土壤保持量模数及其时间变化量表(表 1)。

长吉图地区土壤保持量总体呈现东高西低,南北两侧高中间低的空间分布特征。其中,土壤保持量高值区主要集中在延边州的珲春市与和龙市,两市土壤保持平均模数分别为 $39.61, 31.74\text{ t/km}^2$, 20 a 间最高土壤保持模数为 53.80 t/km^2 ;土壤保持低值区主要集中在长春市区域,该区域内土壤保持平均模数均低于

2.40 t/km^2 , 20 a 间最高土壤保持模数为 5.96 t/km^2 ;土壤保持一般区域有轻微变化,主要集中在吉林市区域与延边州西部区域,土壤保持模数维持在 $2 \sim 20\text{ t/km}^2$ 。在时间变化上,2000—2010 年土壤保持量增加区域主要集中在长吉图中南部,最大增长值为 $1\,076.10\text{ t/km}^2$,具体来说,快速增长区包括丰满区、蛟河市与永吉县,其土壤保持变动模数分别为 $19.94, 16.56$ 与 12.80 t/km^2 ;中速增长区包括敦化市、安图县与和龙市南部,区域土壤保持变动模数在 7.00 t/km^2 上下浮动;低速增长区包括长春市与吉林市主城区部分,土壤保持变动模数区间为 $0.19 \sim 4.01\text{ t/km}^2$ 。土

壤保持服务下降区域则分布于研究区东部,最小值为 $-1\,601.65\text{ t/km}^2$,快速减少区域为珲春市、汪清县与图们市,土壤保持变动模数区间为 $-32.78\sim-11.56\text{ t/km}^2$;缓慢减少区域为龙井市、延吉市,土壤保持变动模数在 -5.00 t/km^2 浮动。2010—2020 年土壤保持量的变化趋势与前 10 a 变化呈现显著变化趋势,

存在变化的主要区域相似,但区域内的增降性质发生互换,最大值为 $1\,189.30\text{ t/km}^2$,位于长吉图东部;最小值为 $-2\,090.96\text{ t/km}^2$,位于长吉图中部。从总时段来看,土壤保持服务下降区域集中于研究区的西南部,其余部分则维持缓慢增长趋势,变化量最值为 $405.76, -1\,014.86\text{ t/km}^2$ 。

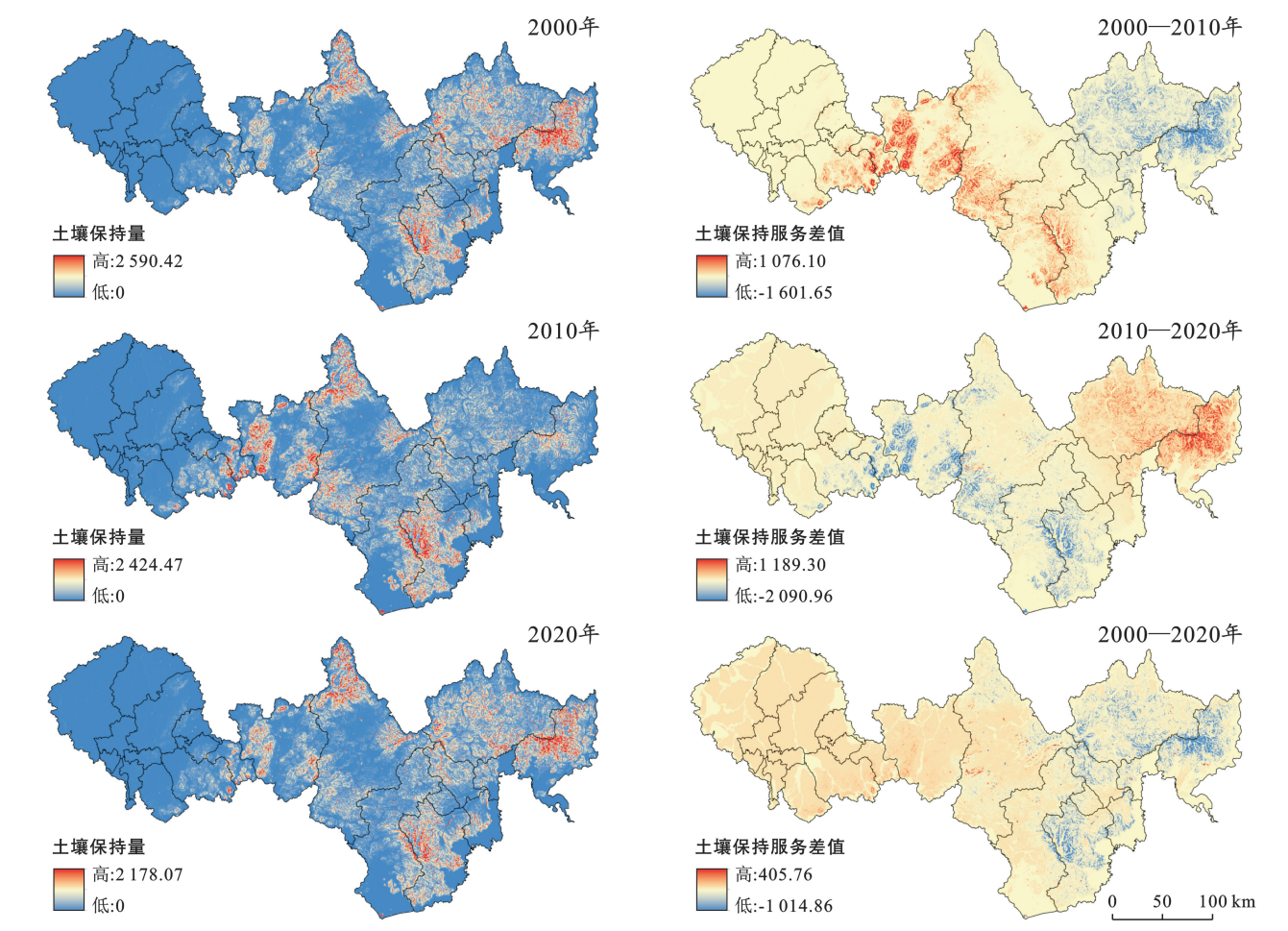


图 5 2000—2020 年长吉图地区土壤保持量模数时空分布

Fig.5 Spatio-temporal variations of soil retention modulus of Changchun-Jilin-Tumen region from 2000 to 2020

总体来看,长吉图地区土壤保持服务总量呈现先增后减趋势,由 2000 年的 $1.16\times 10^8\text{ t}$ 增长为 2010 年的 $1.19\times 10^8\text{ t}$,再下降到 2020 年的 $9.40\times 10^7\text{ t}$ 。而区域像土壤保持服务模数最大值呈现持续下降趋势,2000,2010,2020 年的最大值分别由 $2\,590.42\text{ t/km}^2$ 减少到 $2\,424.47\text{ t/km}^2$ 再降至 $2\,178.07\text{ t/km}^2$ 研究区域土壤保持功能呈现减弱态势。

2.2 土壤保持服务供需及其变化匹配情况

(1) 土壤保持服务供需匹配分析。借助 ArcGIS 中的分区统计工具,得到各年份研究区各地市、县区土壤保持服务供需匹配关系(图 6),其中图 6a 为减少侵蚀服务功能匹配,图 6b 为泥沙持流服务功能匹配。

由图 6 可知,两种土壤保持服务匹配关系的时空分布特征较明显,低低型分布在研究区西部与东南侧,高高型则分布在研究区中部与东部,20 a 间空间属性变化不大,只有较少区域的供需关系有变化。其中,减少侵蚀服务匹配方面,仅有龙井市的匹配关系发生了高低—低低—高高型的变化;泥沙持留服务匹配关系变化相对明显,宽城区呈低低—高低—低低型变换,蛟河市呈高低—高高—高低型变换,安图县呈高低—高高型变换,延吉市呈高低—低低—高低型变换,其他区域则仍维持原类型。

研究区土壤保持服务整体匹配关系相对较好,未出现服务供需匹配关系相对较差的低高型,多为土壤

保持服务匹配相对平衡的高高与低低型,而供需匹配关系相对较好的高低型仅出现在减少侵蚀服务中的

龙井市,泥沙持流服务中的蛟河市、延吉市、安图县与宽城区。

表 1 长吉图地区土壤保持量模数及动态变化(2000—2020)
Table 1 Soil retention modulus and dynamics in Changchun-Jilin-Tumen region (2000—2020)

地 名	土壤保持模数/(t·km ⁻²)				土壤保持变动模数/(t·km ⁻²)		
	2000 年	2010 年	2020 年	平均值	2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
农安县	0.23	0.43	0.30	0.32	0.19	—0.12	0.07
德惠市	0.36	0.58	0.40	0.45	0.22	—0.19	0.03
宽城区	0.29	0.62	0.33	0.41	0.33	—0.28	0.05
绿园区	0.23	0.58	0.29	0.37	0.34	—0.29	0.06
朝阳区	0.26	0.72	0.34	0.44	0.46	—0.39	0.07
九台区	1.28	2.23	1.23	1.58	0.95	—0.98	—0.03
二道区	1.05	2.59	1.16	1.60	1.54	—1.43	0.11
南关区	0.69	1.83	0.80	1.10	1.14	—1.03	0.11
双阳区	1.95	5.96	2.39	3.43	4.01	—3.57	0.44
昌邑区	1.86	3.33	1.77	2.32	1.47	—1.56	—0.09
船营区	3.10	6.29	3.02	4.14	3.20	—3.27	—0.07
永吉县	8.24	21.04	8.99	12.76	12.80	—11.96	0.74
丰满区	14.84	34.77	16.05	21.89	19.94	—19.22	0.72
蛟河市	15.71	32.27	15.91	21.30	16.56	—16.37	0.19
敦化市	19.80	26.12	11.55	19.16	6.32	—8.54	—2.21
安图县	18.19	25.25	14.79	19.41	7.07	—10.44	—3.39
汪清县	31.43	15.78	23.66	23.62	—15.65	7.85	—7.81
延吉市	27.95	21.22	20.21	23.13	—6.73	—1.01	—7.74
龙井市	23.58	18.92	16.95	19.82	—4.66	—1.97	—6.63
和龙市	41.52	49.05	31.74	40.77	7.52	—17.36	—9.84
图们市	26.03	14.47	18.83	19.77	—11.56	4.37	—7.19
珲春市	53.80	21.02	39.61	38.14	—32.78	19.47	—13.42
平均值	13.29	13.87	10.47	12.54	0.58	—3.10	—2.54

(2) 土壤保持服务供需变化匹配分析。依据供需变化匹配分析结果,将研究区分成供增需增可持续型、供增需减可持续型、供减需增不可持续型、供需同减不可持续型 4 类型(图 7),其中图 7a 为 2000—2020 年减少侵蚀功能供需变化匹配关系,图 7b 为 2000—2020 年泥沙持留功能供需变化匹配关系。不同时间段上,2000—2010 年,这两类服务功能匹配关系在空间分布上相一致,区域内仅有汪清县、延吉市、图们市与珲春市为供减需减不可持续型,其他区域均为供增需增可持续型。2010—2020 年,供需同减不可持续型为各区域主要匹配类型,就减少侵蚀服务而言,除汪清县、图们市、龙井市与珲春市为供需同增可持续型外,其他区域都属于供需同减不可持续型;就泥沙持留服务而言,匹配关系更加多样。其中

南关区、敦化市与安图县为供减需增不可持续型,图们市为供增需减可持续型,汪清县与珲春市为供需同增可持续型,其他区域则为供需同减不可持续型。总时间段上,土壤保持服务动态匹配关系更为复杂,不可持续区域占区域面积较广,分别占比 68.15%(减少侵蚀),72.57%(泥沙持留),集中分布在研究区东侧以及西侧的中间部分,即延吉州、长春市与吉林市相邻区域;可持续区域中供增需减型分布范围最小,分布区域只有减少侵蚀服务中的宽城区与绿园区,泥沙持留服务中的二道区与蛟河市。供需同增型方面,减少侵蚀服务分布于农安县、德惠市、二道区、朝阳区、南关区、双阳区、永吉县、丰满区与蛟河市,泥沙持留服务分布于农安县、德惠市、双阳区、昌邑区、船营区与丰满区。



图 6 2000—2020 年长吉图地区土壤保持服务供需匹配关系

Fig.6 Matching supply and demand for soil conservation services of Changchun-Jilin-Tumen region from 2000 to 2020

3 讨论

本文在分析长吉图地区土壤保持服务时空演变特征的基础上,利用土壤保持服务静态匹配关系分类,探究研究区土壤保持服务供需匹配的空间差异,结合前文结论,借鉴前人生态管控分区研究^[22-23],将研究区划分为土壤敏感区、土壤脆弱区、土壤修复区,其生态管理工作应分别以土壤整治、土壤保育、土壤修复为主。

(1) 土壤敏感区集中分布在长吉图地区中东部,包括和龙市、珲春市、汪清县、敦化市、蛟河市与安图县。该区域以长白山中山低山区、低山丘陵区为主,植被覆盖高,既是土壤保持服务能力的最优区域,同时也是土壤侵蚀与泥沙流失最严重的地区,是研究区最需要增强全域土壤保护与治理区域。其中敦化市、汪清县、安图县、和龙市及珲春市地区,由于其土壤保持服务供需变化匹配呈不可可持续发展趋势,其土壤整治的优先级最高。

(2) 土壤脆弱区集中分布在长吉图地区东部尾端,包括延吉市与龙井市,延吉市泥沙持留能力较强,

龙井市减少侵蚀能力较强,但在 20 a 间两种土壤保持服务功能均呈供需同减不可可持续发展类型,区域内植被盖度高,自然本底较好,需进一步保护生态资源优势,增强土壤保持服务水平。

(3) 土壤修复区集中分布在长吉图地区西部,该区域土壤保持服务相对稳定,供需匹配关系较为平衡,但该区域耕地分布广、建设用地占比大,人类活动严重影响土壤保持服务,其中宽城区、朝阳区、绿园区、南关区、永吉县、九台区、昌邑区、船营区与图们市地区的供需匹配不可可持续发展也在警示着该区域内的潜在土壤侵蚀问题,在社会经济发展过程中,需进一步增强土壤生态管理意识。

结合《吉林省水土保持规划(2016—2030 年)》《2018—2021 年吉林省水土保持公报》等发现,吉林省正值经济社会发展的重要转型期,资源环境约束日益增强,水土流失综合防治进程与新时期生态文明建设要求存在较大差距,区域资源开发造成的水土流失是水土保持监管重点。

本文所选择的 2000,2010,2020 年 3 期数据,恰好反映了新形势下长吉图地区土壤保持现状与供需

匹配状态、水土保持生态建设工作的修复情况及未来水土保持治理需求与方向。认为 20 a 间研究区土壤保持服务呈现先降后增的倒 U 型特征,映射出长吉图经济社会发展总体态势和水土保持生态建设推进的现实拉锯。随着长吉图一体化协同发展逐步推进实施,2000—2010 年因地区经济社会快速发展、资源开发强度增强,水土流失综合防治投入远远不能满足

生态建设要求,“重建设、轻生态、轻保护”问题依然存在,土壤保持服务仍呈现退化态势;2010—2020 年则因前期开展的大规模水土流失综合治理,林草植被覆盖率普遍提高,蓄水减沙与涵养水源能力增强,同时地区经济社会发展水平与生态意识的提高,全社会对生活质量与人居环境提出更高要求,土壤保持服务得到明显改善。

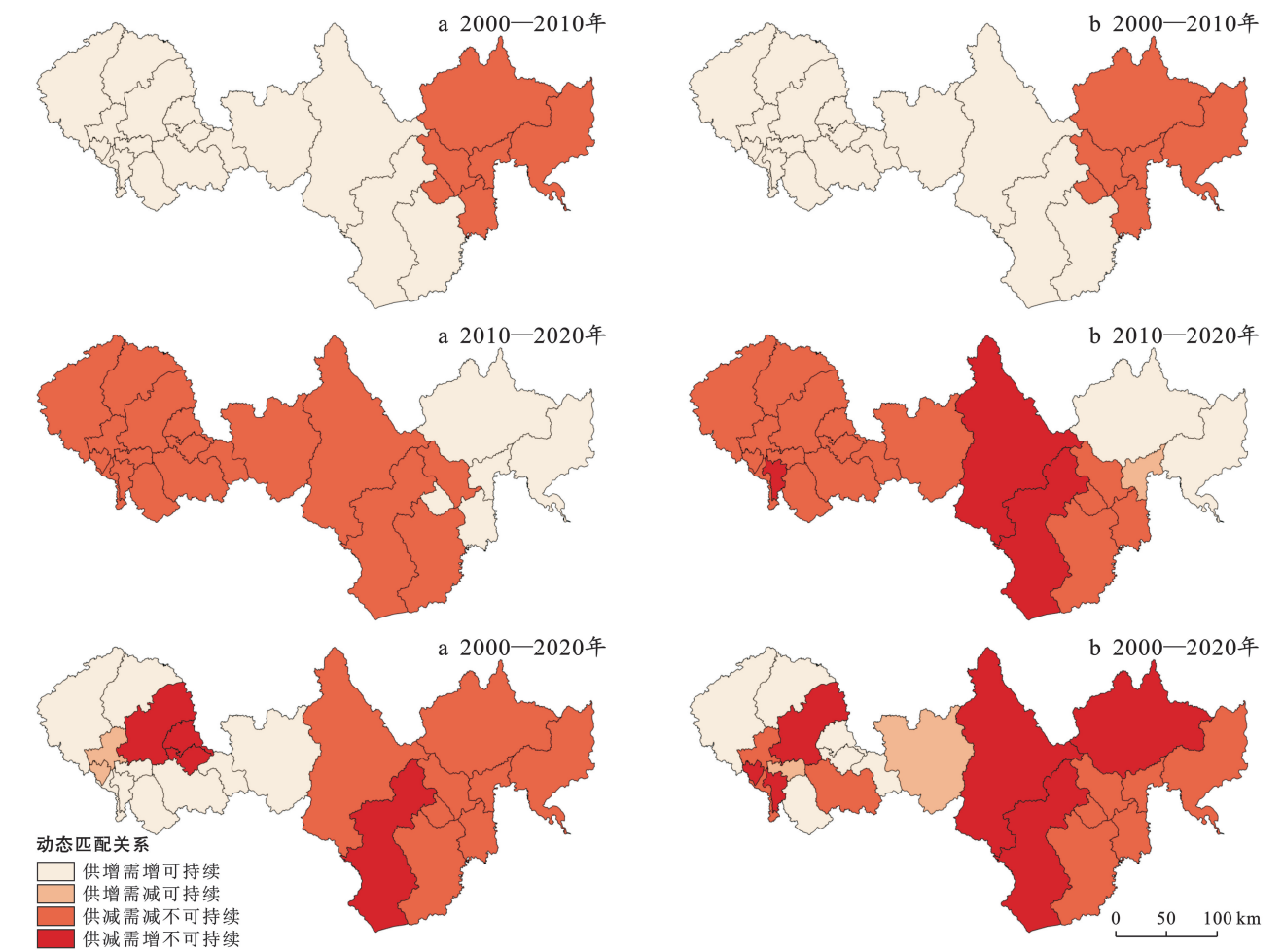


图 7 2000—2020 年长吉图地区土壤保持服务供需动态匹配关系

Fig.7 Dynamic matching of supply and demand for soil conservation services from of Changchun-Jilin-Tumen region 2000 to 2020

此外,必须提及的是,本文基于长时间序列的遥感数据,利用 InVEST 模型、空间分析方法等试图发现土壤保持服务供需匹配的时空异质性特征,但仍存在以下不足:①模型模拟方面。由于数据获取及计算等原因,本文使用逐月降雨、世界土壤数据,数据精度受到限制,结果模拟存在一定误差。②缺乏研究区土壤保持服务变化的驱动因素及其驱动机制分析,难以全面了解区域土壤保持服务的演变机制。因此,未来将立足于供需视角,优化模型模拟数据,结合地区现状建立自然、生态、社会经济 3 方面驱动因素指标体系,进一步探讨土壤保持服务的变化过程与影响机

制,依据吉林省“两带两区”水土流失防治战略空间格局,建立动态化、实时化的土壤保护评价与预测系统,为建成与研究区经济社会发展相适应的水土流失综合防治体系提供决策依据,这既是促进土壤保护生态建设的必要前提,也是优化土壤保持服务功能的关键举措。

4 结 论

选取长吉图地区 22 个地市、县区行政区域作为评价单元,基于 InVEST 模型与所构建土壤保护服务静态匹配关系类型,定量分析长吉图地区 2000—

2020年土壤保持服务时空演变与供需匹配特征,主要结论如下。

(1) 空间分布上,减少侵蚀服务功能呈东高西低分布特征;泥沙持留服务功能则沿区域内水系流域分布,高功能区集中在长吉图中东部;土壤保持服务呈东高西低,东西内部则为两侧高中间低的分布特征。时间变化上,土壤保持服务呈现先增后降趋势,服务水平的优质性降级情况明显,区域间差异显著,如区域土壤保持量模数的极大值由 53.80 t/km^2 降至 39.61 t/km^2 ;减少侵蚀功能模数的极大值由 $1\,270.77 \text{ t/km}^2$ 降至 959.96 t/km^2 ;泥沙持留功能模数的极大值由 $2\,452.20 \text{ t/km}^2$ 降至 $2\,058.48 \text{ t/km}^2$ 。

(2) 土壤保持服务供需匹配的时空分异特征显著,长吉图地区整体上土壤保持服务能力较好,土壤保持服务供需较平衡。匹配类型较少,仅出现高低、高高与低低型匹配类型,低低型分布在研究区西部与东南侧,高高型则分布在研究区中部与东部,且时间变化不明显,只有较少区域存在降/升级转变。

(3) 土壤保持服务供需变化匹配方面,随时间变化趋于复杂,包括供需同增/供增需减可持续、供需同减/供减需增不可持续4种类型,且不可持续区域占比逐渐增大,分别为 68.15% (减少侵蚀), 72.57% (泥沙持留),集中在研究区东西两侧的中间部分,土壤保持服务弱化显著。

(4) 研究区土壤保持服务能力空间差异明显,亟需依据区域土壤保护服务能力分重点整治,分辨各区域的土壤整治、保育与管理需求,以推进区域土壤生态环境保护的有效落实。

[参 考 文 献]

- [1] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems [J]. *Science*, 2008,319:948-952.
- [2] Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity [J]. *Nature*, 2009,461(7263):472-475.
- [3] La Notte A, D'Amato D, Mäkinen H, et al. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 74:392-402.
- [4] Tao Yu, Wang Hongning, Ou Weixin, et al. A land-cover-based approach to assessing ecosystem services supply and demand dynamics in the rapidly urbanizing Yangtze River delta region [J]. *Land Use Policy*, 2018, 72:250-258.
- [5] Zheng Hua, Li Yifeng, Zhiyun Ouyang, et al. Progress and perspectives of ecosystem services management [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(3):702-710.
- [6] Yee S H, Paulukonis E, Simmons C, et al. Projecting effects of land use change on human well-being through changes in ecosystem services [J]. *Ecological Modelling*, 2020,440:109358.
- [7] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 1995,267(5201):1117-1123.
- [8] 倪九派,魏朝富,谢德体.土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J].*生态学报*,2005,25(8):2061-2067.
Ni Jiupa, Wei Chaofu, Xie Deti. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(8):2061-2067.
- [9] Van Oost K, Verstraeten G, Doetterl S, et al. Legacy of human-induced C erosion and burial on soil-atmosphere C exchange [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(47):19492-19497.
- [10] Pradhan B, Chaudhari A, Adinarayana J, et al. Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: A case study at Penang Island, Malaysia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012,184(2):715-727.
- [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] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].*生态学报*,2019,39(2):432-440.
Liu Yue, Zhao Wenwu, Jia Lizhi. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(2):432-440.
- [13] 周日平.黄土高原典型区土壤保持服务效应研究[J].*国土资源遥感*,2019,31(2):131-139.
Zhou Riping. Assessing the soil erosion control service in the typical area of Loess Plateau [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019,31(2):131-139.
- [14] 田宇,朱建华,李奇,等.三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J].*生态学杂志*,2020,39(4):1164-1174.
Tian Yu, Zhu Jianhua, Li Qi, et al. Spatial and temporal distribution of soil conservation and its driving forces in the Three Gorges reservoir area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020,39(4):1164-1174.
- [15] 柳冬青,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子[J].*水土保持研究*,2018,25(4):98-103.
Liu Dongqing, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Spatiotemporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Bailongjiang watershed in Gansu Province [J]. *Research of Soil and Water Conserva-*

- tion, 2018, 25(4): 98-103.
- [16] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.
- Xu Yingde, Pei Jiubo, Li Shuangyi, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 495-504.
- [17] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1278-1288.
- Gong Jie, Liu Dongqing, Gao Bingli, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [18] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35-41.
- [19] 魏健美, 李常斌, 武磊, 等. 基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 31-37.
- Wei Jianmei, Li Changbin, Wu Lei, et al. Study on soil erosion in Northwestern Sichuan and Southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 31-37.
- [20] 高青峰, 郭胜, 宋思铭, 等. 基于 RUSLE 模型的区域土壤侵蚀定量估算及空间特征研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 214-223.
- Gao Qingfeng, Guo Sheng, Song Siming, et al. RUSLE model-based quantitative estimation and spatial characteristics study on regional soil erosion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6): 214-223.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] 彭建, 杨畅, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- Peng Jian, Yang Yang, Xie Pan, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [23] 谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- Xie Yuchu, Zhang Suxin, Lin Bing, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 217-229.

(上接第 180 页)

- [15] 江凌, 肖懿, 欧阳志云, 等. 基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 21-25.
- Jiang Ling, Xiao Yi, Ouyang Zhiyun, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai Province based on RWEQ model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 21-25.
- [16] Wang Wei, Samat A, Ge Yongxiao, et al. Quantitative soil wind erosion potential mapping for central Asia using the google earth engine platform [J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3430.
- [17] 曹月娥, 吴芳芳, 张婷婷, 等. 基于风蚀模型的准东地区土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 94-99.
- Cao Yuee, Wu Fangfang, Zhang Tingting, et al. Research and application of wind erosion model in Zhundong area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(3): 94-99.
- [18] Chi Wenfeng, Zhao Yuanyuan, Kuang Wenhui, et al. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 204-215.