

DOI: 10.5846/stxb202105291417

王盛, 李亚文, 李庆, 胡世雄, 王金凤, 李文静. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究. 生态学报, 2022, 42(13): 5391-5403.

Wang S, Li Y W, Li Q, Hu S X, Wang J F, Li W J. Water and soil conservation and their trade-off and synergistic relationship under changing environment in Zhangjiakou-Chengde area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5391-5403.

变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究

王 盛¹, 李亚文¹, 李 庆^{2,*}, 胡世雄³, 王金凤¹, 李文静¹

1 山西师范大学地理科学学院, 太原 030000

2 河北省科学院地理科学研究所/河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011

3 宾夕法尼亚州立东斯特劳斯堡大学地理系, 东斯特劳斯堡 18301-2999

摘要: 张家口-承德地区是京津冀环境优化的战略要地, 开展水源涵养和土壤保持服务的定量评估对维护生态系统的安全运行意义重大。综合运用 InVEST 模型、空间偏相关统计制图及情景模拟等手段, 分析了张承地区近 20 年水源涵养和土壤保持服务的时空变化特征及其复杂空间关系, 定量评估二者对气候和土地利用变化的响应。结果表明: 2000—2019 年张承地区水源涵养量、土壤保持强度分别以 0.97mm/a 的速率增加和 $-0.50\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的速率减少, 空间上二者均呈西低(坝上高原)东高(冀北及燕山山地)的分布格局。冀北及燕山山地落叶阔叶林生态区水源涵养和土壤保持能力强, 二者空间关系以协同为主; 坝上高原草原与农业生态区则权衡关系更占优势。水源涵养和土壤保持服务关系复杂, 空间上与区域土地利用类型、植被覆盖度和坡度关系密切。情景模拟结果表明, 降水($r=0.90$, $P<0.01$)对水源涵养服务的影响远大于潜在蒸散($r=-0.37$, $P>0.1$), 且降水变幅越大对水源涵养量的作用越强; 而降水变化与土壤保持服务呈线性正相关关系, 降水每增加(减少)10%引起土壤保持强度增加(减少) 74.7t/hm^2 。预计 2030 年张承地区水源涵养能力将明显提升, 土壤保持能力变化不大, 届时人为干扰(如生态保护、规划控制)将对提升水源涵养服务产生重要影响。为改善张承地区水源涵养和土壤保持服务, 需同时考虑多种因素的综合影响, 以制定更合理的政策措施。建议继续加大国家重点生态工程建设, 尽可能限制建设用地扩张, 提高植被覆盖度, 尤其加强保护关键坡度带是今后生态管理工作应关注的重点。

关键词: 生态系统服务; 水土保持; 权衡与协同关系; 情景模拟; 张家口-承德地区

Water and soil conservation and their trade-off and synergistic relationship under changing environment in Zhangjiakou-Chengde area

WANG Sheng¹, LI Yawen¹, LI Qing^{2,*}, HU Shixiong³, WANG Jinfeng¹, LI Wenjing¹

1 Geography Science Institute, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China

2 Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China

3 Department of Geography, East Stroudsburg University of Pennsylvania, East Stroudsburg 18301-2999, USA

Abstract: Zhangjiakou-Chengde area (ZC area) is a strategic place for the environmental optimization of Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration. The quantitative assessment of water conservation and soil conservation is of great significance to maintain the ecosystem safety. The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model, spatial partial correlation statistical mapping, and scenario simulation are used to comprehensively analyze the temporal and spatial change

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFF0305905); 国家自然科学基金(41801034); 山西省哲学社会科学规划课题(2020YY069, 2020YY070)

收稿日期: 2021-05-29; **网络出版日期:** 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qingli@mail.bnu.edu.cn

characteristics and complex relationships of water conservation and soil conservation services in ZC area in recent 20 years, and quantitatively evaluate their response to climate and land use change. The results showed that water conservation and soil conservation intensity in ZC area increased at the rate of 0.97 mm/a and decreased at the rate of $-0.50 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ from 2000 to 2019, respectively, which were spatially low in the west (Bashang plateau) and high in the east (Yanshan Mountain). The water conservation and soil conservation were strong and mainly synergistic in the northern Hebei and Yanshan Mountains deciduous broad-leaved forest ecological zone; while the trade-off relationship was more dominant in the Bashang plateau grassland and agroecological zone. The spatial relationship between water conservation and soil conservation is complex, which is closely related to regional land use type, vegetation coverage and slope. The scenario simulation results showed that the impact of precipitation ($r = 0.90$, $P < 0.01$) on water conservation service was much greater than the potential evapotranspiration ($r = -0.37$, $P > 0.1$), and the greater variation of precipitation, the stronger water conservation. There was a linear positive correlation between precipitation and soil conservation service, and each 10% increase (decrease) of precipitation caused the increase (decrease) of 74.7 t/hm^2 in soil conservation intensity. It is expected that water conservation capacity of ZC area will be significantly improved in 2030, while soil conservation capacity will not change much. By then, human activities (such as the policy measures related to ecological protection or planning control) will become the significant impact on improving water conservation service. In order to improve water conservation and soil conservation services in ZC area, the comprehensive impact of various factors should be considered to formulate more reasonable ecological protection policies. It is suggested to continue to strengthen the construction of national key ecological projects, to limit the expansion of construction land as much as possible and improve vegetation coverage to protect the natural ecosystem, especially to strengthen the protection of key slope zones, which should be the focus of water conservation and soil conservation services in the future.

Key Words: ecosystem service; water and soil conservation; trade-off and synergy; scenario simulation; Zhangjiakou-Chengde area

生态系统服务是人类通过生态系统直接或间接获取的各种效益,主要分为供给、调节、支持及文化服务四种类型^[1-2]。它是人类可持续发展的基础,也是国家与区域生态安全的战略保障^[3-4]。近年来,随着工业化和城镇化的快速发展,人类活动加剧,全球生态系统服务一直处于不断退化中。千年评估报告指出全球 24 项生态系统服务中,有 15 项正在退化^[5]。当前,生态系统服务评估研究已成为地理学、生态学等多学科的热点和前沿。水源涵养和土壤保持服务作为重要的生态系统调节服务,在调节径流、涵蓄土壤、减少水土流失、补充地下水等方面具有重要影响^[6-7],并且在生态系统的能量流动、物质循环等环节发挥着不可忽视的作用^[8]。由于生态系统服务的复杂性及差异性,常常表现出此消彼长的权衡关系及同时增强或减弱的协同关系^[9]。因此,准确评价水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系,对于促进区域可持续发展,推进生态安全,提高人类福祉具有重要意义^[10]。

张家口-承德地区(张承地区)作为京津冀地区重要的生态屏障,在风沙防治、环境净化、保持水土以及涵养水源等方面具有重要的作用。2018 年,河北省政府划定“生态保护红线”,指出冀北燕山山区、承德坝上高原东北部地区主要发挥着水源涵养、土壤保持功能^[11],进一步明确了张承地区对于京津冀地区生态服务的重要功能。近年来,张承地区广泛开展了“水源涵养林”建设等一系列生态治理工程,在减少水土流失等方面成效显著,但其环境问题尚未根本解决,部分地区仍存在生态退化现象。随着京津冀一体化以及第 24 届冬季奥林匹克运动会在北京、张家口市的联合举办,张承地区成为社会关注热点并将迎来新一轮的发展契机,但区域发展与生态保护如何协调的问题也亟待解决。

生态系统服务的早期评估存在研究对象单一、评价标准不同、结论片面等问题^[12-13],为满足定量评估的需求,InVEST、SoLVES、ARIES 和 SWAT 等多种评估模型相继出现,其中 InVEST 模型具有驱动数据易获取、参数调整简便、结果可视化等优点,应用最为广泛^[14-16]。运用 InVEST 模型,巩飞等^[17]定量评价了张北坝上地区水源涵养功能的空间分布特征,发现林地的水源涵养能力最强,旱地的水源涵养总量最大,水源涵养总量空

间分布不均匀。李怡颖等^[18]估算了张家口市 1981—2015 年水源涵养量并对其时空变化特征进行分析,结果表明水源涵养量呈微弱下降趋势,空间上表现为康保、宣化周围区县增加,沽源、蔚县等减少。许丁雪等^[19]估算张家口-承德地区土壤保持量,发现灌木林地的土壤保持能力最强。随着研究的深入,学者们开始关注不同生态系统服务之间的复杂关系。刘华妍等^[20]运用 SPSS 相关分析法发现北京市水源涵养和土壤保持服务之间存在显著权衡关系。王晓萌^[21]运用局部空间自相关法分析河北省县域尺度下土壤保持与农作物生产的权衡/协同空间集聚特征,发现协同关系主要分布在隆化、滦平和康保县;权衡关系在蔚县、阳原县较为集中。张宇硕和吴殿廷^[22]研究表明,京津冀地区水源涵养与土壤保持服务在区县尺度上表现出明显的协同关系,土地利用是生态系统服务的主要影响因子,且影响程度呈上升趋势。

目前,对于张承地区生态系统服务的研究,主要集中在水源涵养、土壤保持服务的时空变化评估以及土地利用因子影响,缺乏气候因素对生态系统服务的影响及未来预测的综合性研究;在权衡协同关系研究中,主要基于统计关系的数量分析,缺乏空间内部异质性的精细描述。因此,本研究以生态分区及生态功能区为单位,利用 InVEST 模型的产水和土壤保持模块模拟了 2000—2019 年张承地区水源涵养、土壤保持 2 种生态系统服务,分析时空变化特征;从空间像元尺度上评估二者的权衡与协同关系。在此基础上,设立多种情景定量讨论气候变化对水源涵养和土壤保持服务的影响程度;利用 CA-Markov 模型,模拟 2030 年自然发展、生态保护和规划控制 3 种情景下的土地利用结构,评估土地利用变化对水源涵养和土壤保持服务的影响。为未来张承地区的健康发展提供科学指导,使其更好地发挥对京津冀地区的生态保护作用,促进人地关系和谐发展。

1 研究区概况

张承地区(39°18′—42°37′N, 113°50′—119°15′E, 图 1)位于河北省北部,毗邻北京市,占地面积 7.6×10^4 km²。地貌以高原、山地、丘陵为主,地势由西北向东南倾斜。气候类型以温带大陆性季风气候为主,冬冷夏热、水热同期。区域水资源丰富,河流众多,主要有永定河、潮白河、辽河、大清河、滦河、大凌河、北三河、内陆河等,大多属于海河流域上游河段。依据中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp>),结合地区地貌及植被类型,将张承地区划分为 3 个生态区和 14 个生态功能区(表 1)。其中(A)坝上高原草原与农业生态区地势由南向北降低,年均温 -0.3—3.5℃,年降水量 340—450mm,多大风,西部多为栗钙土,东部多为黑沙土和灰色森林土,水资源缺乏,该区超载放牧导致草地退化、水土流失问题严重。(B)冀北及燕山山地落叶阔叶林生态区以低山、丘陵为主,年降雨量 600—700mm,水资源丰富,为滦河、潮白河等水系的上游或发源地,植被种类繁多,是水源涵养和土壤保持的重点地区。(C)永定河上游山间盆地林农草生态区以盆地和低山丘陵为主,年均温 10℃ 以上,年降水量 380—510mm,该区主要生态问题是土壤侵蚀、水土流失^[23—24]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究的基础数据包括气象、水文、DEM、土地利用和土壤等资料。气象数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),包括 2000—2019 年研究区周边 30 个气象站点的日尺度降水、潜在蒸发数

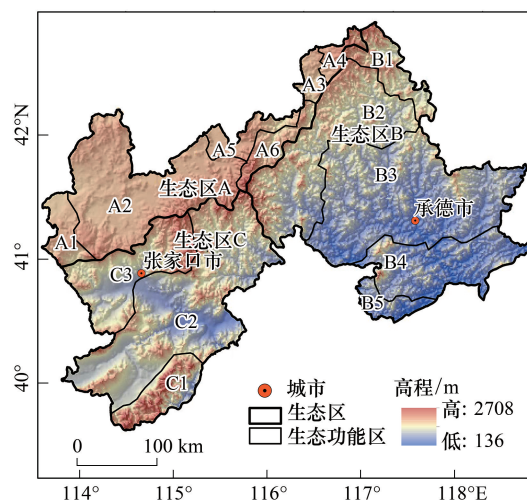


图 1 张家口-承德地区(张承地区)的地理位置及生态分区概况

Fig. 1 Location and ecological zone in Zhangjiakou-Chengde area

据;水文水资源数据主要来源于河北省和海河流域水资源公报,用于 InVEST 模型产水模块的参数率定;DEM 来源于中国科学院地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>),为 SRTM 90m 分辨率栅格数据;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),包括 2000、2005、2010、2015、2018 年 5 期空间分辨率 100m×100m 的栅格数据,划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类;土壤数据包括土壤类型图和土壤属性数据,由中国科学院南京土壤所的中国 1:100 万土壤数据库获得。

表 1 张家口-承德地区(张承地区)生态区及生态功能区

Table 1 Ecological zone and ecological function regionalization in Zhangjiakou-Chengde area

生态区 Ecological zone	生态功能区 Ecological function regionalization
A 坝上高原草原与农业生态区 A. The Bashang plateau grassland and agroecological zone	A1 尚义干草原风蚀控制生态功能区 A2 坝上内陆湖区农牧与生态恢复区 A3 御道口农牧与水土保持功能区 A4 塞罕坝森林与水土保持生态服务功能区 A5 闪电河东部荒漠化控制生态功能区 A6 承德坝上高原南部水源涵养与沙化防治生态区
B 冀北及燕山山地落叶阔叶林生态区 B. The northern Hebei and Yanshan Mountains deciduous broad-leaved forest ecological zone	B1 辽河流域林牧与水源涵养服务功能区 B2 燕山山地北部水源涵养与土壤保持生态功能区 B3 燕山山地中部生物多样性、水资源保护服务功能区 B4 燕山山地南部林果与水土保持、涵养水源生态服务功能区 B5 兴隆林果水源涵养生态服务功能区
C 永定河上游山间盆地林农草生态区 C. Forest agriculture and grass ecological region in the mountain basin of the upper reaches of Yongding River	C1 小五台山水源涵养与生物多样性保护功能区 C2 冀西北山间盆地中部农牧林果与水土保持生态服务功能区 C3 怀安万全盆地沙化治理与土壤保持生态功能区

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型产水和土壤保持模块

InVEST 模型产水模块以气象、土地利用类型、土壤及其它数据为基础,广泛应用于供水服务。产水量与地形指数、土壤饱和导水率、径流流速系数等参数结合可计算出最终的水源涵养量^[25-26]。模型的主要算法:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \cdot P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \cdot ET_{ox}}{P_x} \quad (4)$$

$$TI = \text{Log}(D/S \cdot P) \quad (5)$$

$$WC = \min(1, 249/V) \cdot \min(1, 0.9 \cdot TI/3) \cdot \min(1, K/300) \cdot Y \quad (6)$$

式中, WC_{xj} 和 Y_{xj} 为栅格 x 中土地利用类型 j 的年水源涵养量 (mm) 和产水量 (mm); AET 为年实际蒸散发量 (mm), P_x 为年降水量 (mm), 气象数据采用 ANUSP-LIN42 模型空间插值得到; ω_x 为无量纲参数, 表示植被年需水量与年降水量的比值; R_{xj} 为潜在蒸发量 (ET_{ox}) 与降水量 (P_x) 的比值, 即 Budyko 干燥度指数^[25]; Z 为季节常数, 取值范围一般在 0—30 之间, 根据《河北省水资源公报》中张承地区地表水资源总量率定确定; AWC_x 为植物有效含水量 (mm), 利用非线性拟合土壤 AWC 估算模型得到^[27]; K_{xj} 为植被蒸散系数, S 为土壤深度 (mm), 取值借鉴海河流域和河北省相关研究成果^[15,28]; TI 为地形指数, 无量纲; D 为区域汇水量, 无量纲; P 为坡度比; V 代表流速系数; K 代表土壤饱和导水率 (cm/d)。

土壤保持是地表植被对水土流失量的降低,也是对研究区上游泥沙的拦截。在 InVEST 模型中考虑了地块拦截上游沉积物的能力,土壤保持量为土壤侵蚀减少量和泥沙持留量两部分的总和。土壤侵蚀减少量为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差,其中潜在土壤侵蚀量为无植被覆盖和任何水土保持措施下的土壤侵蚀量,实际土壤侵蚀量为考虑地表植被覆盖和水土保持措施下的土壤侵蚀量。模型的主要算法为:

$$\text{SEDRET}_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot (1 - C_x \cdot P_x) + \text{SEDR}_x \quad (7)$$

$$\text{SEDR}_x = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} \text{USLE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (8)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (9)$$

式中, SEDRET_x 和 SEDR_x 分别为栅格 x 的土壤保持量(t)和泥沙持留量(t); USLE_x 和 USLE_y 分别为栅格 x 及其上坡栅格 y 的实际土壤侵蚀量(t); SE_x 代表泥沙持留效率; R_x 为降水侵蚀力因子($\text{MJ mm h}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),利用 Wischmeier 公式基于月降水量和年降水量计算^[29]; K_x 为土壤可蚀性因子($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),利用 Williams 等建立的公式计算^[30]; LS_x 为坡度坡长因子,无量纲; C_x 和 P_x 分别为植被与经营管理因子和水土保持措施因子,借鉴河北省相关研究成果^[15],对 C 、 P 因子赋值,如表 2。

表 2 不同土地利用类型的植被经营管理因子 C 和水土保持措施因子 P ^[15]

Table 2 The crop-management factor (C) and support practice factor (P) for different land use types^[15]

土地利用类型 Land use types	水田 Paddy field	旱地 Dry land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
C	0.04	0.08	0.003	0.04	0	0.001	1
P	0.15	0.55	1	1	0	0.001	1

2.2.2 权衡和协同关系计算方法

权衡关系是指一种生态系统服务随其他生态系统服务的增加而减少、或者随其他生态系统服务的减少而增加,呈现出此消彼长的关系;协同关系是指两种生态系统服务具有同样的上升或降低趋势,一种服务的增加会对另一种服务产生一定的促进和增幅作用。采用逐像元偏相关的时空统计制图方法定量评估生态系统服务之间的相互关系^[31],不仅可以研究生态系统服务连续的时间演变规律,还可以对其相互关系进行明晰的定量制图。具体计算步骤为:

$$r_{12(ij)} = \frac{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \sqrt{ES1_{(ij)}}) (ES2_{n(ij)} - \sqrt{ES2_{(ij)}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \sqrt{ES1_{(ij)}})^2 \sum_{n=1}^n (ES2_{n(ij)} - \sqrt{ES2_{(ij)}})^2}} \quad (10)$$

$$r_{12 \cdot 3(ij)} = \frac{r_{12(ij)} - r_{13(ij)} r_{23(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{13(ij)}^2) (1 - r_{23(ij)}^2)}} \quad (11)$$

式中, $ES1$ 与 $ES2$ 分别代表 2 种生态系统服务; r 为 $ES1$ 与 $ES2$ 之间的相关系数,若 $r>0$,表明生态系统服务之间存在协同关系, $r<0$ 存在权衡关系, $r=0$ 则无相关关系; i 、 j 分别代表栅格数据中像元的行、列号; n 为栅格数据的时间序列。 $r_{12(ij)}$ 代表降水量发生变化时, $ES1$ 与 $ES2$ 在像元 ij 上的相关系数,同理求得 $r_{13(ij)}$ 、 $r_{23(ij)}$; $r_{12 \cdot 3(ij)}$ 代表在降水量不变的情况下, $ES1$ 与 $ES2$ 在像元 ij 上的一级偏相关系数,以此划分权衡与协同系数的显著性等级:极显著协同($r>0$, $P<0.05$);显著协同($r>0$, $0.05<P<0.1$);协同($r>0$, $P>0.1$);权衡($r<0$, $P>0.1$);显著权衡($r<0$, $0.05<P<0.1$);极显著权衡($r<0$, $P<0.05$)。

2.2.3 CA-Markov 模型及未来 2030 年土地利用状况预测

CA-Markov 模型综合了 Markov 模型长期预测、CA 模型复杂空间系统演变的优势^[32],能更准确地从时空尺度上模拟土地利用类型的变化。Markov 模型主要依据初始时期到另一不同时期的状态间转移概率与矩阵,预测未来某时刻的土地利用变化趋势^[33]。

$$S_{t+1} = S_t \cdot P_{ij} \quad (12)$$

式中, S_t 和 S_{t+1} 分别为 t 和 $t+1$ 时刻土地利用系统的状态; P_{ij} 为状态转移矩阵。

元胞自动机(CA)是一种时间、空间、状态都离散的局部格网动力学模型,具有模拟复杂系统时空演化过程的能力^[34—36]。

$$S_{t+1} = f(S_t, n) \quad (13)$$

式中, S 为元胞有限、离散的状态集合; t 和 $t+1$ 表示不同的时刻; n 为元胞的邻域; f 为局部空间的元胞转换规则。

运用 CA-Markov 模型,共设置 3 种情景模拟 2030 年张承地区的土地利用变化,并进一步预估水源涵养和土壤保持量的发展动态。(1)自然发展情景:土地利用变化延续 2000—2019 年的土地转移速率,土地类型之间的转变不受到外界人为、政策、社会等因素的影响;(2)生态保护情景:根据《河北省土地利用总体规划》中合理利用农耕地、加强保护生态用地的要求,设置林地、草地、耕地、水域转换为建设用地的面积分别减少 90%、90%、50%、20%,并禁止未利用地转换为建设用地;(3)规划控制情景:依据《河北省“十四五”规划》中扩大城市空间等规定,设置耕地、林地、草地和未利用地向建设用地转换的面积增加 3%,并禁止水域转换为建设用地。

3 结果与分析

3.1 时空变化特征

3.1.1 时间变化特征

2000—2019 年张承地区水源涵养量和土壤保持强度的年际变化如图 2 所示。近 20 年来,张承地区单位

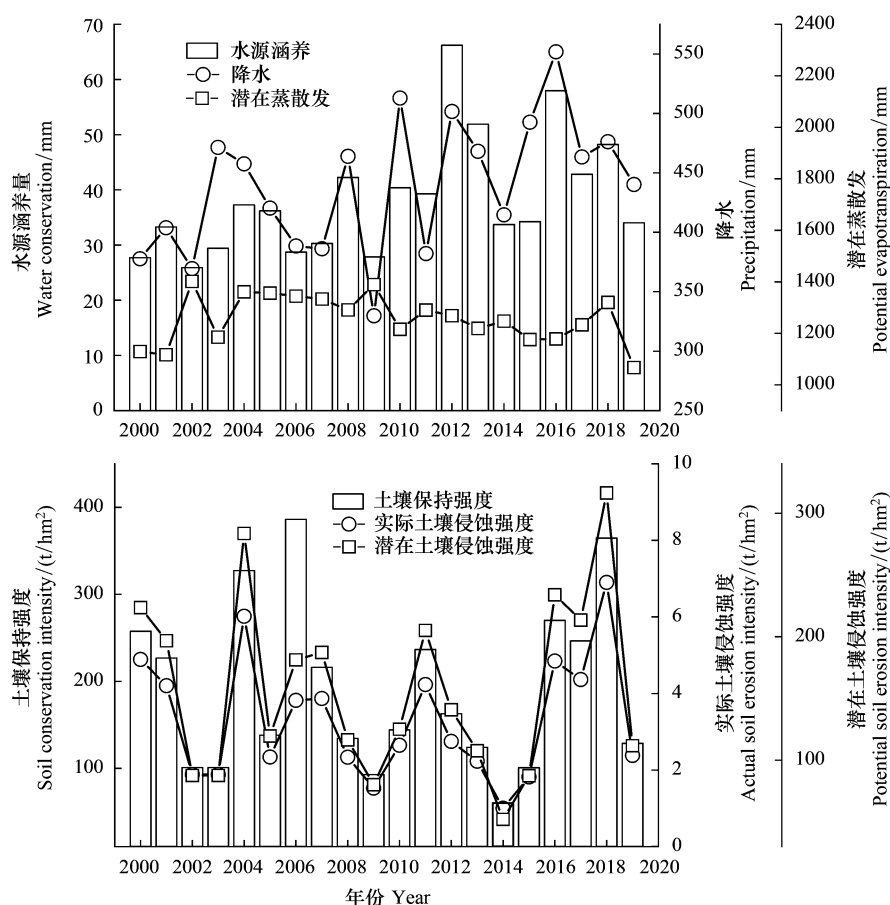


图 2 2000—2019 年张承地区水源涵养量和土壤保持强度的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of water conservation and soil conservation intensity in ZC area from 2000 to 2019

面积平均水源涵养量为 38.4mm, 相当于水源涵养总量为 $29.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其年际变化整体上呈现波动上升趋势, 平均增长率为 9.7mm/10a, 与京津冀水源涵养量呈增加趋势的研究成果一致^[37]。其中, 2012 年单位面积水源涵养量最大, 达到 66.2mm; 2002 年最小, 仅有 25.9mm。根据水量平衡原理, 水源涵养量的增加是降水的年际增加趋势 (47.2mm/10a) 和潜在蒸发的减少趋势 (20.4mm/10a) 共同作用的结果。研究区多年平均土壤保持强度 (即单位面积土壤保持量) 为 $191.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 年际变化呈现微弱减少趋势, 减少率为 $-0.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与京津冀土壤保持量下降结果一致^[22]。而多年平均实际和潜在土壤侵蚀强度分别为 $3.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $157.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其变化均呈现极微弱增加趋势。

3.1.2 空间分布格局与变化特征

图 3 展示了张承地区 2000s (2000—2009 年)、2010s (2010—2019 年) 水源涵养量的空间分布及其变化特征。从空间分布看, 总体上水源涵养量表现为西低东高的分布格局, 尤其是 2010s 这种特征更为显著。水源涵养服务高值区主要分布在冀北及燕山山地 (B 区), 单位面积水源涵养量达 45.6mm, 其中 B5 生态功能区的水源涵养能力最强 (54.4mm)。水源涵养服务低值区集中分布在 A 区, 单位面积水源涵养量为 29.0mm, 尤其是坝上高原西部地区 (A1、A2 和 A5 区)。从空间变化特征看, 2000s—2010s 研究区 91.0% 的面积水源涵养量有所增加, 平均增加了 13.0mm。不同生态区水源涵养量增加存在明显差异, B 区增加最多 (16.2mm), 尤其是 B5 区增加了 20.5mm; C 区次之 (11.3mm), 而 A 区最少 (9.1mm)。

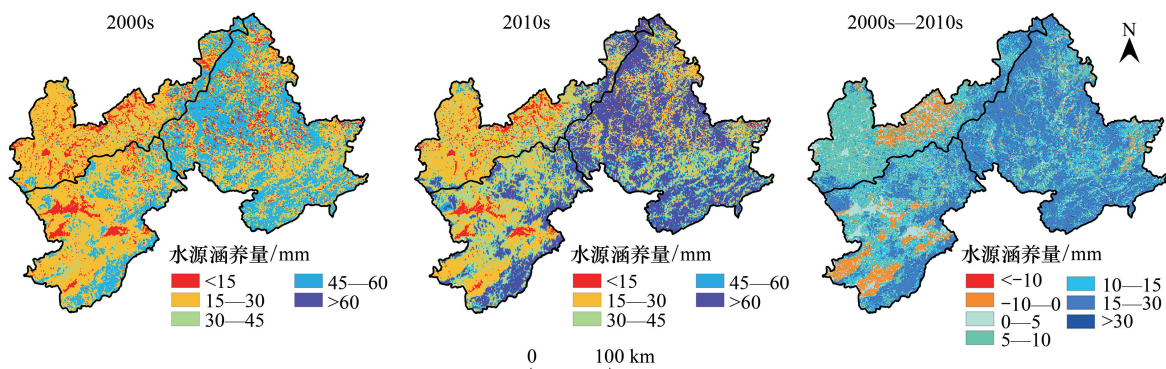


图 3 2000s、2010s、2000s—2010s 张承地区水源涵养量空间格局及变化特征

Fig.3 Spatial pattern and change characteristics of water conservation in ZC area in 2000s, 2010s, and 2000s—2010s

研究区 2000s、2010s 单位面积土壤保持量的空间分布及其变化特征如图 4。与水源涵养量的空间分布相似, 土壤保持强度也呈西低东高的分布格局, 具体表现为冀北及燕山山地 ($270.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) > 永定河上游

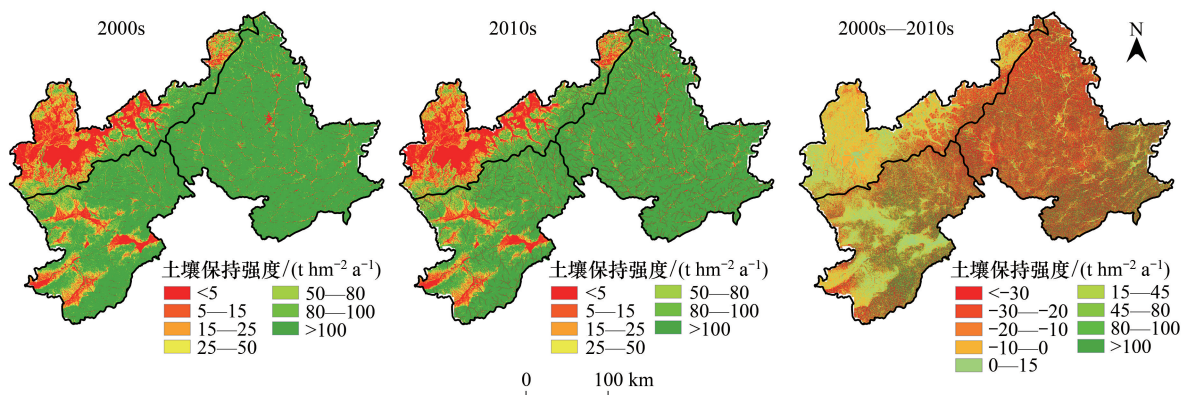


图 4 2000s、2010s、2000s—2010s 张承地区土壤保持强度的空间格局及变化特征

Fig.4 Spatial pattern and change characteristics of soil conservation intensity in ZC area in 2000s, 2010s, and 2000s—2010s

($158.0\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$) > 坝上高原地区 ($32.1\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)。不同生态功能区的土壤保持能力差异巨大,单位面积土壤保持量最高的 B5 区达到 $507.3\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,而最低的 A1 区仅为 $14.8\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,二者相差 34 倍。从空间变化特征看,2000s—2010s,研究区 48.0% 土地面积的土壤保持量减少,40.1% 土地面积的土壤保持量增加,11.9% 的区域则不变。整体上以减少为主,减少了 $18.3\times 10^6\text{ t}$,这与近年来张承地区耕地、林草地转化为建设用地有关。不同生态区土壤保持强度变化存在明显差异,B 和 A 区分别减少 8.1 和 $2.5\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,而 C 区增加 $6.6\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,尤其 C1 区增加了 $24.6\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。从土地利用及其变化看,B 和 A 区林草地面积基本保持不变,而建设用地迅速增加(B 区增加 252.9%;A 区增加 58.4%),很可能是土壤保持强度减少的主要原因;C 区土壤保持强度增加可能是由于林地、草地等生态用地面积扩大(1.2%),降水增多(15.9%)引起。

3.2 权衡与协同关系分析

在空间像元尺度,对张承地区水源涵养和土壤保持服务的权衡与协同关系进行定量分析(图 5);协同关系的像元面积占比为 51%,权衡关系占比为 45%,协同关系所占区域略多于权衡关系。从空间分布上看(图 5 和 6),B、C 区协同像元占比均超过 50%,以协同关系为主;尤其在承德南部(B4 和 B5 生态功能区)显著/极显著协同关系的像元占比超过 10%。A 区权衡和协同的像元占比分别为 48.0% 和 45.0%,整体上权衡关系略占优势。从不同土地利用类型看,林地、草地协同面积占比分别为 57.6%、54.7%,其中林地显著/极显著协同面积占比合计 12.0%,而草地也达到 9.8%。其它土地利用类型则为权衡关系占优势,其中未利用地权衡像元占比为 54.5%,其次为耕地 52.6%。从不同坡度看,不同坡度带都以协同关系为主,没有明显差异。然而,随着坡度的增大,显著/极显著协同的像元比例逐渐增加(7.8%—15.4%),显著/极显著权衡的像元比例逐渐减少(3.7%—0)。说明坡度较大的山区水土保持的协同效益更优。

3.3 水源涵养和土壤保持服务的影响因素分析

3.3.1 气候敏感性实验

水源涵养、土壤保持服务受气候影响,特别是降水的影响。保持土地利用条件不变,以 2010s 的平均气候状况为基准,对降水和潜在蒸发量分别调整 30% 和 10% 以定量评估张承地区水源涵养量、土壤保持量的变化趋势(图 7)。在潜在蒸发不变的条件下,降水 $\pm 30\%$ 引起水源涵养量变化 102.7% 和 -67.9%,降水 $\pm 10\%$ 引起水源涵养量变化 31.4% 和 -26.8%。而在降水不变的条件下,潜在蒸发 $\pm 30\%$ 造成水源涵养量变化 -27.2% 和 46.0%,潜在蒸发 $\pm 10\%$ 造成水源涵养量变化 -10.8% 和 13.1%。水源涵养量与降水呈现显著正相关($r=0.90$, $P<0.01$),与潜在蒸发呈现不显著负相关($r=-0.37$, $P>0.1$),综合来看,降水变化对水源涵养服务的影响远大于潜在蒸发,降水增加(潜在蒸发减少)引起的水源涵养量变幅大于降水减少(潜在蒸发增加),而且在降水剧烈变化时对水源涵养量变幅造成的影响更大。在潜在蒸发弱(70%)、正常(100%)和强(130%)的条件下,降水 -30% 造成水源涵养量的变幅分别为 -63.8%、-67.8% 和 -66.2%,差异很小;但降水 +30% 引起水源涵养增加量为 86.5%、102.7% 和 117.1%。由此可知,干旱气候条件下潜在蒸发对研究区水源涵养服务贡献有限,但湿润气候条件下潜在蒸发的影响显著增强。相比而言,气候变化对土壤保持服务的影响相对简单,降水变化与土壤保持强度呈极显著线性正相关关系($r=1$, $P<0.01$),降水每增加(减少)10% 引起土壤保持强度增加(减少) 74.7 t/hm^2 。

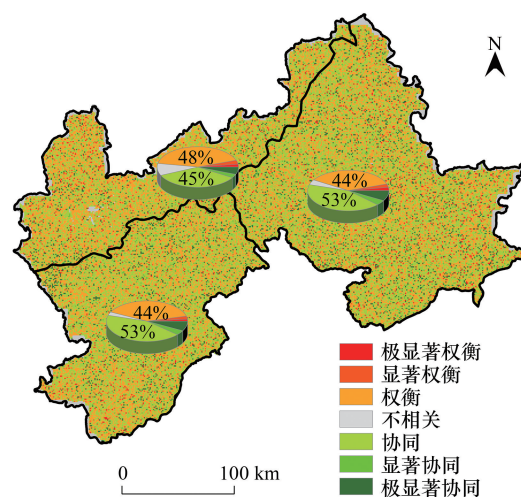


图 5 生态功能区水源涵养和土壤保持服务空间协同与权衡关系

Fig.5 Spatial trade-off and synergy of water conservation and soil conservation services in different ecological function area

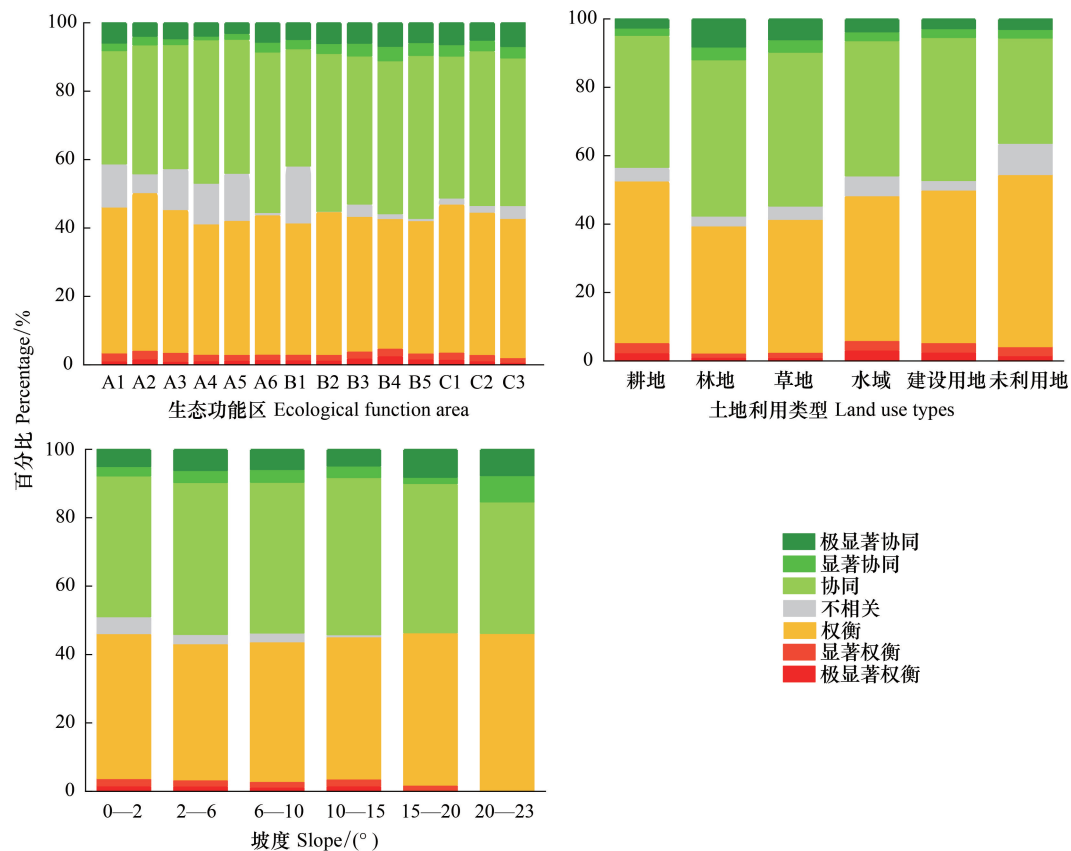


图6 不同生态功能区、土地利用类型和坡度条件下的水源涵养与土壤保持服务协同与权衡关系

Fig.6 Trade-off and synergy between water conservation and soil conservation services under ecological function area, land use and slope interval

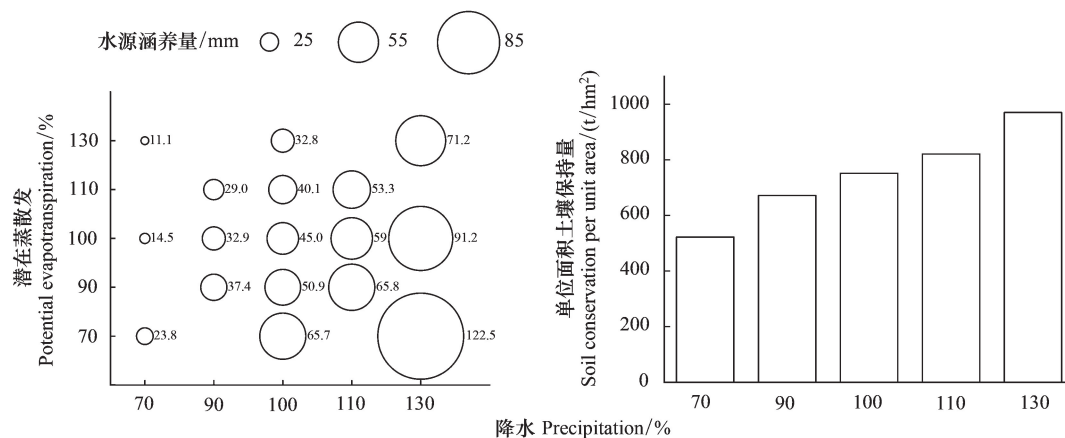


图7 气候驱动力对水源涵养和土壤保持服务的影响

Fig.7 Impacts of climate drivers to water conservation and soil conservation services

3.3.2 不同情景下2030年土地利用、水源涵养和土壤保持服务的发展动态

情景模拟可预测不同发展预设(自然发展、生态保护、规划控制)前提下区域未来土地利用、水源涵养量和土壤保持量的变化趋势。从土地利用类型看(图8,表3),张承地区以林地、耕地和草地为主,面积之和达到总面积的94.9%。2000—2018年,建设用地面积增加最为显著(1600km²),其次是林地(460km²),二者激

增主要由耕地转移而来,净转换面积达 1590km²,造成耕地面积大量减少,建设用地的扩张主要是由于近年来人口增加及城市化进程对土地资源的需求快速增长,而耕地减少、林地增加在一定程度上反映了区域生态修复工程和政策的有效实施。相较于 2018 年,2030 年土地利用变化最显著的特征是规划控制和自然发展情景下建设用地快速扩张,分别增加了 1710km²(64.0%)和 1630km²(61.0%),而生态保护情景下建设用地萎缩 1530km²(-57.3%)。与自然情景相比,生态情景模拟下林草地面积增加显著,共增加 2860km²。

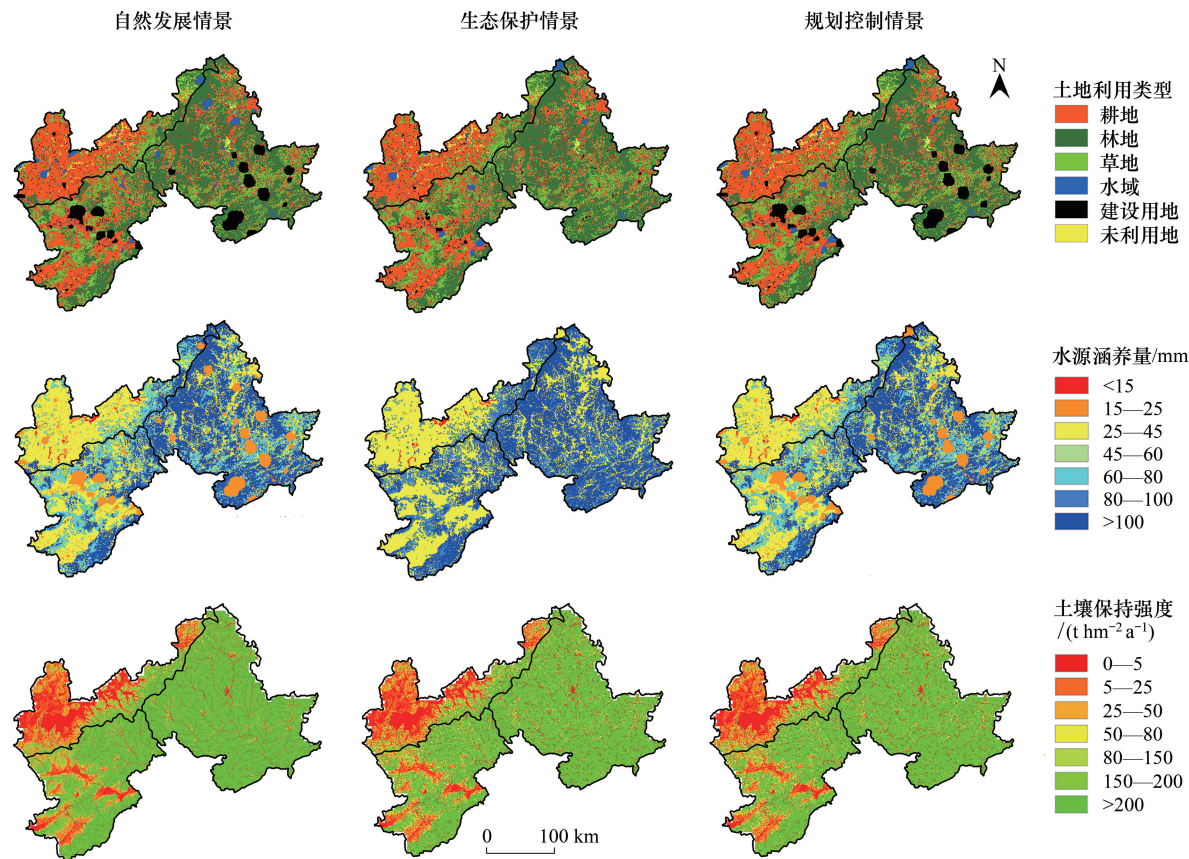


图 8 2030 年自然发展、生态保护和规划控制情景下土地利用、水源涵养量和土壤保持强度的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of land use, water conservation and soil conservation intensity under natural development, ecological protection and planning control scenarios in 2030

表 3 2000、2018 和 2030 年不同情景下土地利用变化状况

Table 3 Land use change in 2000, 2018 and 2030 under different scenarios

土地利用类型 Land use types	面积 Area/10 ³ km ²				
	2000	2018	2030 年自然发展情景 Business as usual scenario in 2030	2030 年生态保护情景 Ecological conservation scenario in 2030	2030 年规划控制情景 Planning control scenario in 2030
耕地 Farmland	25.74	25.54	26.59	27.21	26.4
林地 Forestland	26.44	26.9	24.74	26.29	24.88
草地 Grassland	20.13	19.89	17.13	18.44	17.39
水域 Waters	1.1	1.01	2.06	1.73	1.77
建设用地 Construction land	1.07	2.67	4.3	1.14	4.38
未利用地 Unused land	1.71	0.18	1.37	1.38	1.37

2030 年自然发展、生态保护和规划控制情景下张承地区水源涵养和土壤保持服务的空间分布如图 8。与 2010s 相比,3 种情景下水源涵养量均呈现不同程度的增加趋势,表现为生态保护情景(39.68mm, 88.4%)>规

划情景(28.12mm, 62.7%)>自然情景(22.87mm, 51.0%)。说明未来人类活动干预将显著增强区域水源涵养能力。从空间分布上看(表4),B区的水源涵养能力最强,C区次之,A区最弱;相较于2010s(或2000s),2030年3种不同情景下水源涵养量的增幅与百分比也为B区>C区>A区。说明区域整体水源涵养能力都显著增强,但空间分布格局未发生明显变化。相比于水源涵养,未来张承地区土壤保持能力略有提升,3种情景下没有明显差异。空间上土壤保持能力的强弱顺序为B区>C区>A区,且未来的分布格局也未发生变化,这与水源涵养量时空变化特征较为一致。

表4 2000s、2010s和2030年不同情景下各生态功能区水源涵养量和土壤保持量状况

Table 4 Water conservation and soil conservation in 2000s, 2010s and 2030 of ecological function zones under different scenarios										
生态功能分区 Ecological function zones	单位面积水源涵养量/mm Water conservation per unit area					单位面积土壤保持量/(t/hm ²) Soil conservation per unit area				
	2000s	2010s	自然发 展情景	生态保 护情景	规划控 制情景	2000s	2010s	自然发 展情景	生态保 护情景	规划控 制情景
A1	23.06	34.38	42.47	52.41	45.55	14.37	15.12	15.9	15.94	15.95
A2	21.16	28.36	33.45	38.97	35.64	16.96	16.06	17.13	16.83	16.83
A3	30.12	42.86	70.78	85.31	76.93	21.8	18.76	19.29	18.83	18.83
A4	41.44	59.01	89.09	104.87	91.99	74.52	64.99	66.04	67.22	67.24
A5	26.41	33.44	47.78	56.84	51.63	37.76	33.55	34.97	32.44	32.44
A6	35.01	50.29	84.48	101.83	91.07	141.61	128.35	133.36	128.08	128.07
A	24.43	33.51	44.79	52.99	47.78	33.41	30.87	32.24	31.33	31.33
B1	31.95	46.07	71.36	83.04	74.03	184.35	167.31	175.56	177.77	177.79
B2	38.12	55.4	89.55	110.04	97.19	226.04	207.14	215.33	215.47	215.5
B3	36.48	51.41	80.38	101.32	86.17	229.06	221.07	230.09	231.82	232.05
B4	39.77	57.13	87.1	115.58	92.67	452.18	460.48	476.82	490.26	490.92
B5	44.17	64.62	96.87	131.57	104.35	503.37	511.22	531.37	546.24	546.79
B	37.49	53.67	84.14	106.06	90.24	274.27	266.18	277.06	280.89	281.14
C1	39.94	57.12	92.74	112.37	100.06	386.49	411.06	424.41	421.5	421.5
C2	30.05	40.12	58.8	71.23	62.1	137.56	142.18	147.61	146.59	146.66
C3	27.07	38.89	57.97	72.64	61.61	91.65	95.18	98.47	99.46	99.63
C	30.42	41.74	62.47	76.26	66.27	154.73	161.3	166.99	166.53	166.62
ZC	31.87	44.87	67.74	84.55	72.99	182.03	180.13	187.72	188.93	189.07

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究水源涵养量持续增加的结论与京津冀地区相关研究一致^[19,37—38],证明 InVEST 模型具有良好的区域动态评估性能。也说明2000年以来京津冀生态环境支撑区(如水源涵养林)建设、山水林田湖草生态修复等工程措施的效果显著。整体上水源涵养和土壤保持服务之间以协同关系为主,这与其他学者采用皮尔逊相关、生态系统服务簇等方法的研究成果一致^[39—41]。然而,在研究区内部,两种服务的空间关系呈现显著异质性。水源涵养与土壤保持能力最强的冀北及燕山山地(B区)显著协同关系面积最大,该区多为缓坡丘陵地形,林草地面积广阔,植被覆盖度达76.1%,植被类型以华北落叶松林为主,林冠层截留作用显著,起到了减轻土壤侵蚀和涵养水源的生态功效。坝上高原(A区)地区两种服务呈微弱的权衡关系,具体表现为水源涵养服务趋好,而土壤保持服务并不理想,土壤侵蚀并未明显减轻。近年来,坝上高原地区降雨量和降雨强度增强^[42—43],过量降水溅蚀、冲刷作用显著,造成土壤保持功能下降^[44]。这说明自然因素(尤其是降水)对土壤保持服务的影响比人为因素(生态措施)更为重要,但生态措施也一定程度上起到缓解作用。不同生态系统服务的共同因素或主导因素在其空间复杂关系中发挥了重要作用,未来在宏观层面上探讨不同区域各种生态系

统服务权衡与协同关系的深层次原因将成为重要研究方向^[45]。

已有研究^[22]发现,气候、土地利用变化是影响京津冀地区产水量和土壤侵蚀量的主导因素。本研究量化了主要气候因子对水源涵养服务的影响程度,发现降水对水源涵养量的影响远大于潜在蒸发,降水与水源涵养量呈非线性的正相关,降水剧烈变化对水源涵养量造成的影响更大。同时土地利用类型及变化对水源涵养服务作用明显,不同土地利用类型的水源涵养能力顺序为:林地(56.5mm)>草地(35.5mm)>耕地(26.1mm)>建设用地(19.4mm)>未利用地(17.3mm)。未来预测结果也表明人为干扰(生态保护、规划控制情景)下水源涵养能力明显提升(62.7%—88.4%)。说明降水因子和土地利用都是引起水源涵养量变化的关键因素。对于土壤保持服务,降水是重要影响因子,降水量每增加(减少)10%引起土壤保持强度增加(减少)74.7t/hm²。而土地利用变化影响不大,未来3种情景下土壤保持强度增幅不超过5%。空间关系表明坡度较大的山区水土保持协同效益更优,对不同坡度土壤保持强度进行统计,土壤保持能力随坡度增大表现为先增加后减小,单位面积土壤保持量的最大坡度范围是16—20°。主要是因为林地在这一区域分布范围广,人类活动干预少。这与我国其他区域的研究结论相似,刘婷等^[46]指出延河流域土壤保持量随坡度变化规律明显,25°的坡面是土壤保持量的关键带。而刘洋^[47]发现疏勒河土壤保持量存在坡度临界值,坡度超过35°时土壤保持量减少。

因此,在开展生态管理时,需同时考虑多种因素的综合影响,以制定更合理的政策措施。为改善张承地区水源涵养和土壤保持服务,建议继续加大京津风沙源治理、三北防护林和退耕还林还草等国家重点生态工程建设;尽可能限制建设用地的增加以保护环境,提高植被覆盖度,尤其是加强保护关键坡度带(16—20°),是今后水土保持工作应重点关注的区域。

4.2 结论

(1)2000—2019年张承地区年均水源涵养量、土壤保持强度为38.4mm、191.0t/hm²,其年际变化分别呈增加和微弱减少趋势。空间上均呈现西低(坝上高原)东高(冀北及燕山山地)的分布格局。

(2)张承地区水源涵养和土壤保持服务总体上呈协同关系,但不同生态区存在显著空间异质性,坝上高原多为权衡关系,而在燕山山地、永定河上游以协同关系为主。在开展生态管理时,需考虑到整体与局部空间的不同以及多种因素的综合影响,以制定更合理的生态保护政策。

(3)降水和土地利用类型及变化是作用于张承地区水源涵养服务的关键因子,而土壤保持服务主要受降水和坡度的影响。情景预测结果表明,在人类活动(如生态保护、规划控制政策)干扰下,2030年研究区水源涵养能力将显著提升,而土壤保持能力增幅不大。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [3] 张永民,赵士洞. 全球生态系统服务的状况与趋势. *地球科学进展*, 2007, 22(5): 515-520.
- [4] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10.
- [5] Hassan R, Scholes R, Ash N. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [6] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. *地理研究*, 2010, 29(3): 383-396.
- [7] 孙龙,陈利顶,杨磊. 基于氢氧同位素技术的流域水源涵养研究进展. *生态学报*, 2020, 40(24): 8872-8881.
- [8] 李双成,张才玉,刘金龙,朱文博,马程,王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [9] 吕一河,胡健,孙飞翔,张立伟. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [10] Xu S N, Liu Y F, Wang X, Zhang G X. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: a case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 297-306.
- [11] 姚雪平,陈艳梅,马心宇. 河北省生态保护红线关键区的确定与建议. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 242-247.
- [12] 邓楚雄,刘俊宇,李忠武,肖海兵,聂小东,张宇婷,周咪. 近20年国内外生态系统服务研究回顾与解析. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2119-2128.

- [13] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [14] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [15] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [16] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. 地理学报, 2017, 72(3): 521-532.
- [17] 巩飞, 罗勇, 田犀, 于慧. 张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估. 草业科学, 2020, 37(7): 1337-1344.
- [18] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析. 草业科学, 2020, 37(7): 1313-1324.
- [19] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 刘海江, 江源. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [20] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 田宇, 张倩如, 朱建华. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析. 生态学杂志, 2021, 40(1): 209-219.
- [21] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 刘苗苗, 赵倩石, 王雪然, 王新云. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究. 地理与地理信息科学, 2021, 37(1): 80-88.
- [22] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析. 地域研究与开发, 2019, 38(3): 141-147.
- [23] 杨伟州, 邱硕, 付喜厅, 赵丽, 张蓬涛. 河北省生态功能区划研究. 水土保持研究, 2016, 23(4): 269-276.
- [24] “河北省生态与灾害研究”课题组. 河北省生态区划研究. 地理与地理信息科学, 2003, 19(5): 82-85.
- [25] Budyko M I. Climate and Life. Academic Press, 1974.
- [26] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [27] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95.
- [28] 李夫星. 基于 USLE 模型的河北省土壤侵蚀评价研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [29] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 5189.
- [30] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 129-144.
- [31] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [32] 郎文婧, 李效顺, 卞正富, 曲福田. 徐州市区土地利用格局变化分析及其空间扩张模拟. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 592-599.
- [33] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟. 生态与农村环境学报, 2019, 35(12): 1531-1540.
- [34] 侯西勇, 常斌, 于信芳. 基于 CA-Markov 的河西走廊土地利用变化研究. 农业工程学报, 2004, 20(5): 286-291.
- [35] 韩玲玲, 何政伟, 唐菊兴, 李少达. 基于 CA 的城市增长与土地增值动态模拟方法探讨. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 32-35.
- [36] 蔺卿, 罗格平, 陈曦. LUCC 驱动力模型研究综述. 地理科学进展, 2005, 24(5): 79-87.
- [37] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 曹巍. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(15): 5151-5167.
- [38] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000-2018). Ecological Indicators, 2021, 121: 107116.
- [39] Shen J S, Li S C, Liang Z, Liu L B, Li D L, Wu S Y. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Ecosystem Services, 2020, 43: 101103.
- [40] Yang Y Y, Zheng H, Kong L Q, Huang B B, Xu W H, Ouyang Z Y. Mapping ecosystem services bundles to detect high- and low-value ecosystem services areas for land use management. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 11-17.
- [41] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. Science of the Total Environment, 2019, 662: 824-833.
- [42] Liu M Z, Min L L, Zhao J J, Shen Y J, Pei H W, Zhang H J, Li Y L. The impact of land use change on water-related ecosystem services in the Bashang area of Hebei Province, China. Sustainability, 2021, 13(2): 716.
- [43] 武爱彬, 赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析. 农业工程学报, 2017, 33(2): 283-290.
- [44] Smith R E, Goodrich D C. Rainfall Excess Overland Flow. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Anderson M G, McDonnell J J (eds). United Kingdom: John Wiley & Sons, 2006.
- [45] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. 生态学报, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [46] 刘婷, 周自翔, 朱青, 白继洲. 延河流域生态系统土壤保持服务时空变化. 水土保持研究, 2021, 28(1): 93-100.
- [47] 刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.