

文章编号:0559-9350(2021)02-0203-12

基于元胞自动机与改进A*算法的 砾石土摊铺实时监控作业路径规划

焦 铮, 王佳俊, 王晓玲, 崔 博, 佟大威, 关 涛

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 砾石土摊铺是心墙堆石坝施工的重要环节, 其厚度和平整度是表征摊铺质量的关键指标。然而, 现有的摊铺作业路径规划高度依赖人工经验, 存在主观性强的缺陷, 因而摊铺质量难以得到有效控制。针对上述问题, 本研究提出了一种基于元胞自动机与改进A*算法的砾石土摊铺实时监控作业路径规划方法。该方法通过改进A*算法中的轨迹距离度量函数并引入避障冗余距离优化全局路径的规划和选取, 同时结合质量评价函数优化局部动态路径规划方法, 从而实现摊铺作业全局-局部混合路径规划。此外, 通过建立砾石土摊铺质量元胞自动机模型, 将施工机械的实时监控数据转化为仓面各网格的质量信息, 实现质量信息的实时更新。工程应用表明, 本研究提出的方法在保证施工效率的前提下, 能够控制摊铺厚度在0.27 m左右, 有效避免超厚超薄现象的发生, 且平整度相较人工提高了22.6%。

关键词: 砾石土摊铺; 元胞自动机; 混合路径规划; A*算法; 实时监控

中图分类号: TV523.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200734

1 研究背景

土石坝填筑施工的基本作业包括卸料、摊铺、碾压以及质量检查等多个环节。砾石土摊铺是大坝主体工程的重要环节, 通常采用自卸车运输卸料再由推土机推土铺平的方式进行施工, 且摊铺厚度与平整度直接影响后续的碾压施工, 并对大坝施工质量产生重要影响。然而, 砾石土摊铺具有较大的灵活性, 尤其是推土机作业需要操作手根据经验选择作业路径, 人的主观性较大, 易出现质量不达标返工的情况。因此, 开展推土机的摊铺作业路径规划对保证摊铺质量具有重要的意义^[1]。

近几年来, 国内外对于摊铺质量的研究取得了较为丰富的成果。在沥青摊铺领域中, Chang G K等^[2]通过在压路机和摊铺机上安装GNSS、加速度计以及热扫描仪等测量仪器, 通过采集施工过程中的位置、厚度、温度等信息实现了对沥青混凝土摊铺质量的事中控制, 并且借助测量仪器减小了人为因素的影响, 提高了摊铺质量控制的精度; 虞将苗等^[3]在港珠澳大桥的施工过程中采用同步摊铺的铺筑工艺, 通过改进施工方式, 提高了摊铺施工效率和摊铺质量控制的精度; 刘东海等^[4]研制了便携式测温测厚仪, 可在施工过程中对作业面的厚度, 平整度, 温度等信息进行监测, 在方便测量的同时也可对公路沥青摊铺厚度、温度等进行可视化实时管理。在砾石土摊铺领域中, 钟登华等^[5]提出了心墙堆石坝摊铺施工实时监控方法, 实现了对推土机实时位置的监控, 并可在摊铺结束后生成图形报告反映施工质量; Zhong D等^[6]利用K近邻算法解决了摊铺过程中推土机未接触区域的厚度估计问题, 再结合获取到的机械设备定位信息, 实现了全仓面的厚度监控。综上所述, 现有的针对摊铺工

收稿日期: 2020-09-17; 网络首发时间: 2020-12-10

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201208.1038.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金雅鲁江联合基金项目(U1965207, U1765205, U1865204)

作者简介: 焦铮(1996-), 硕士生, 主要从事摊铺智能监控研究。E-mail: jiaozheng0907@163.com

通讯作者: 王晓玲(1968-), 博士, 教授, 主要从事大坝智能建设研究。E-mail: wangxl@tju.edu.cn

艺的研究多集中于沥青摊铺领域,更关注于施工过程中的质量控制,利用先进的测量装置,改进的施工工艺,可视化的管理等方式实现了高精度的事中控制。而砾石土摊铺领域停留在施工参数监控的层面,仍然依赖人工经验选定推土机作业路径,未能实现对摊铺质量的有效控制。

实现推土机作业路径的规划首先应该解决实时信息的感知问题。摊铺过程中所有机械行动均是以施工质量为导向的,仅仅依靠对机械的监控不足以反映全仓面的质量情况。元胞自动机具有规则化状态转移以及离散化更新存储的特点,可为该问题提供解决方案^[7]。元胞自动机是一种基于元胞的模型,其元胞以网格状结构表示^[8],该方法在气体扩散^[9]、土地利用演进^[10]、城市发展^[11]以及洪水演进^[12]的研究中广泛应用^[13]。可通过状态转移规则将推土机等机械设备的行动转化为全仓面的厚度、平整度等质量信息,以此为推土机路径规划提供可靠的信息来源。

目前在路径规划领域的研究中,全局-局部路径规划由于可通过全局路径规划综合考虑整个场区的场景确定大致的行进路径、并利用局部路径规划处理行进过程中遇到的突发情况(如动态障碍物等)的优势而被众多研究者关注^[14]。Wang Ning等^[15]考虑ASV的动力学约束建立了一种具有全局-局部结构的混合路径规划方案,利用全局路径规划生成最优的稀疏航路点,在每个航路点处利用局部路径规划控制ASV避开障碍物前往下一个航路点;刘好^[16]设计了基于优化A*算法的全局路径规划算法,提升了路径搜索效率,并提出了基于MPC的局部避障路径规划方法用于处理动态障碍物的问题;在全局路径规划算法中,较为流行的算法主要有快速扩展随机树算法(RRT)、人工势场法(APF)以及A*算法,各个算法具有不同的特点,适用于不同类型的路径规划的情况,由于A*算法具有较快的计算速度,且规划出的路径轨迹长度为最优,因而被广泛应用。而局部路径规划算法更关注对于小范围内作业过程的处理^[17]。时梦楠等^[18]提出了满足搭接法和错矩法施工原理的碾压运动模型进行子作业面的路径规划,把无人碾压作业划分为往复碾压和条带错矩两种工作模式并分别建模计算,以此实现局部作业路径的规划。综上所述,混合路径规划的方式能够综合考虑路径规划的全局走向以及局部动态调整从而取得良好效果。

本文开展了砾石土摊铺实时监控作业路径规划方法的研究,需要依次解决以下两个问题:(1)如何将施工机械信息转化为整个仓面的质量情况;(2)如何利用整个仓面中的质量情况指导施工。

针对问题(1),结合摊铺施工工艺和元胞自动机理论,建立砾石土摊铺质量元胞自动机模型,元胞自动机将此监控数据转化为摊铺质量信息并存储至对应位置的元胞中,由此实现实时监控数据向全仓面质量信息的转化。针对问题(2),基于砾石土摊铺质量元胞自动机模型,构建了考虑坝面复杂环境和施工作业特点的推土机路径规划方法,主要包括基于改进的A*算法的全局静态路径规划方法和面向局部质量评价的动态路径规划方法两个部分,前者用于选择并前往最优的土堆,后者用于指引推土机将土堆推平。利用该方法,可有效减小摊铺施工对人工经验的依赖程度。

2 研究框架及数学模型

2.1 研究框架 本文的研究框架分为参数获取、研究方法以及工程应用三部分^[19],如图1所示。

参数获取部分主要分为摊铺过程参数和仓面初始信息。摊铺过程参数由推土机实时位置信息以及自卸车卸料信息构成。前者是通过在推土机上安装监控终端感知卫星系统的定位信息并加以处理得到的实时位置信息,后者是通过在自卸车上安装定位终端以及卸料传感器获取到的卸料时间和位置等信息。仓面初始信息是前序碾压工艺的平整度以及通过测量杆确定的仓面边界点坐标。

研究方法部分主要详细的阐述了本研究的理论方法。在元胞自动机模型的模块,通过耦合摊铺施工工艺与元胞自动机理论,建立了砾石土摊铺质量元胞自动机模型,通过接收参数获取部分的输入和邻居元胞的状态信息,再由状态转移规则处理得到元胞的状态信息,由此将获取到的摊铺参数转化为全仓面各位置处的厚度和整体平整度等质量信息,并作为元胞的状态信息储存。在摊铺过程推土机路径规划方法模块中,划分为考虑坝面复杂环境的全局静态路径规划以及考虑施工作业特点的局部动态路径规划两部分,前者解决的是寻找并前往最优土堆的问题,后者解决的是推平指定土

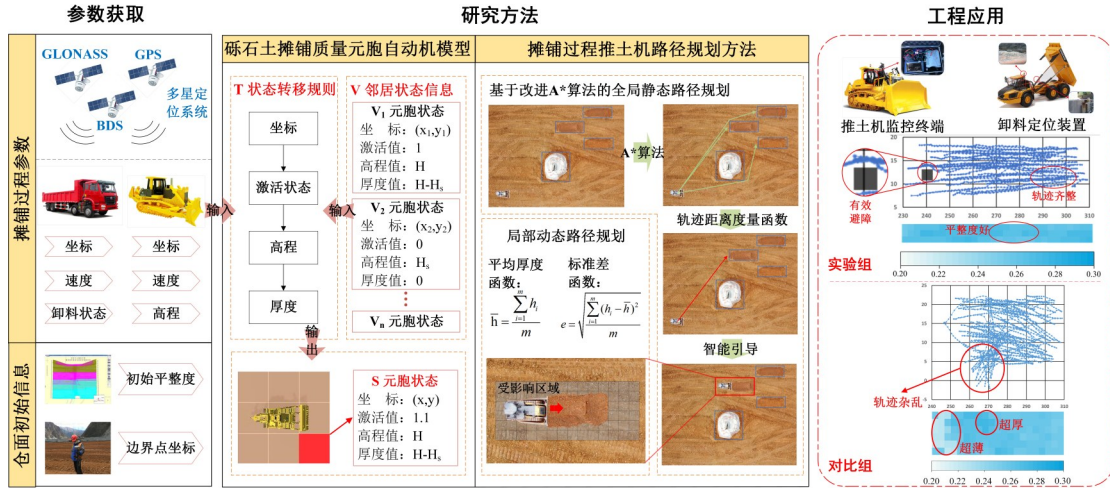


图1 研究框架

堆的问题。

工程应用部分主要包含了推土机与自卸车的硬件布设以及本方法的应用效果等。

2.2 数学模型 由于在摊铺过程中存在多重因素影响，且包含有感知、分析、控制等多个环节，首先，建立质量评价指标集和质量评价目标函数集，再将所有的施工过程参数采集集合为输入参数集；然后，根据参数输入、施工工艺特点以及元胞自动机理论等建立砾石土摊铺质量元胞自动机模型，该模型能够实现摊铺质量信息实时感知，在此基础上搭建路径规划方法集，并根据工艺特点建立全局路径规划和局部动态路径规划引导推土机行动。由此建立摊铺实时监控作业路径规划的数学模型如图2所示，各部分参数的定义及作用如下：

定义了质量评价指标集 F ，其中 f 表示平整度， $\bar{h}$ 表示平均厚度， G 表示图形报告。

定义了质量评价指标求解方法，其中，求解质量评价的函数为 $Opt()$ ， CA 表示参与计算的元胞区域。

定义了输入参数集合 P ，其中， PM 为卸料堆位置参数， PB 为推土机实时空间位置参数， PF 为初始平整度参数， PA 为仓面边界参数。

定义了砾石土摊铺质量元胞自动机模型，其中， CA 表示元胞区域， S 表示元胞的状态信息， T 表示元胞状态转移规则， V 表示指定元胞周围邻居的状态信息， n 代表元胞区域中的元胞数量。

定义了路径规划方法集 P_{path} ，其中， P_{global} 表示全局路径规划方法， $P_{dynamic}$ 表示动态路径规划方法。

定义了全局路径规划方法 P_{global} ，其中，求解函数为 p_g ， A_{Astar} 为应用于路径规划的A*算法， L_α 为轨迹距离度量函数， K 为约束条件集合。

定义了动态路径规划方法 $P_{dynamic}$ ，其中，求解函数为 p_d ， CA_{inf} 为受动态路径规划影响的元胞区域，其 n 值为受影响区域的元胞数量， F_{inf} 表示受影响区域的质量评价指标，是将 CA_{inf} 带入质量评价目标函数中计算得来的^[20]。

定义了该数学模型的约束条件集 K ，其中， KM 表示推土机行动模型， KO 表示仓面中障碍物物理模型。

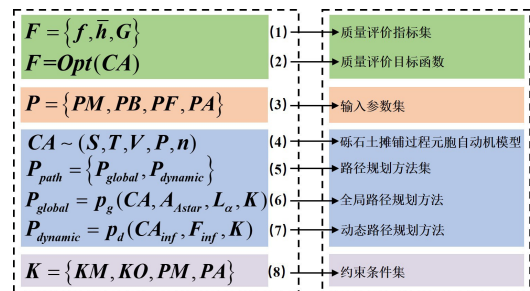


图2 数学模型

3 基于厚度和平整度实时感知的砾石土摊铺质量元胞自动机模型

3.1 砾石土摊铺质量元胞自动机模型 元胞自动机是一种基于元胞的系统^[21]，元胞是包含一定的信

息和规则的离散个体，只受自身状态以及周围元胞状态的影响，公式如下所示：

$$A \sim (S, T, V) \quad (1)$$

式中： A 为一个包含规则的元胞； S 为 A 元胞的状态信息，在本文中，元胞的状态信息包括坐标位置、激活值、高程、厚度等； T 为其状态转移规则，此规则可以由元胞自发执行，也可以由外部(如机械设备影响等)引发执行； V 为 A 元胞周围邻居的状态信息。

可将仓面划分为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的方形网格，每个网格对应一个元胞，元胞中储存对应网格的位置坐标、高程、厚度等信息，元胞的每个状态信息都对应着其状态转换规则，元胞中各状态的转移按照以下顺序进行：

(1)元胞坐标在仓面划分阶段取得之后就不再变化；

(2)元胞激活值是通过获取实时监控数据以及周围元胞激活状态信息确定的。未激活的状态值为0，当推土机空间位置坐标与元胞坐标重合时激活值为1，当周围有元胞激活值为1时，该元胞的激活状态值变为1.1。当自卸车空间位置坐标与元胞坐标 (x, y) 重合时此元胞激活值变为2，同时将元胞坐标为 $(x, y-1)$ 和 $(x, y+1)$ 的激活值变为2，以此确定土堆的宽度上存在的元胞的激活值全部更新为2，为保证土堆的长度上所有元胞按位置激活，可根据图3所示的卸料过程图，将元胞坐标为 $(x+1, y)$ 的激活值变为2.01，以此类推，有元胞的激活值为 $2+0.01n$ ($0 < n < 16$)，则其 y 方向上两侧元胞的激活值同样变为 $2+0.01n$ ， $x+1$ 位置处的激活值变为 $2+0.01(n+1)$ ；

(3)高程可根据该元胞的激活值有不同的获取方法，当激活值为1或2时，高程等于推土机或自卸车的实时监控数据中的高程值。当激活值为1.1时，由于此元胞处于推土机下方，因而高程值等于此时激活值为1元胞的高程值。当激活值为 $2+0.01n$ ($0 < n < 16$)时，各个元胞对应的是卸料堆的各个位置，根据3.2节摊铺工艺分析中介绍的自卸车卸料模式以及图4所示的卸料过程图，应根据式(2)更新：

$$H = \begin{cases} H_{old} + 0.15n & 0 \leq n \leq 4 \\ H_{old} + 0.6 & 0 < n < 4 \\ H_{old} + 2.4 - 0.15n & 0 \leq n \leq 4 \end{cases} \quad (2)$$

式中： H 为该元胞的更新后的高程，m； H_{old} 为该元胞的更新前的高程，m。

(4)厚度一般根据该元胞中高程值进行更新，由于厚度更新为元胞状态更新的最后一个步骤，因此进行完厚度更新后，将激活状态值设置为0。厚度状态转移应满足式(3)：

$$h = H - H_{start} \quad (3)$$

式中： h 为厚度，m； H 为该元胞的更新后的高程，m； H_{start} 为整个仓面的起始高程，m。

首先，根据3.3节所述的方法获取仓面初始信息，根据仓面角点坐标及初始高程等信息，建立模拟仓面；其次，将仓面划分为等大的方格，每个网格对应一个元胞。元胞将对应网格的坐标、激活状态、高程、厚度等存储为状态信息。当施工机械行进至某个元胞对应的网格时，该元胞会激活并判断机械类型(推土机或是自卸车)。若为推土机，该元胞通过分析本节3.3中的方法获取到推土机监控数据，根据上述的状态转换规则，计算得到受影响区域元胞的高程及厚度信息并更新。若为自卸车，同样需要根据本节3.3所述方法获取到卸料信息，再根据相应的状态转移规则对受影响区域元胞的各个状态值进行更新，由此收集并反馈卸料情况的影响。

综上所述，建立了砾石土摊铺质量元胞自动机模型，将仓面网格划分，利用元胞自动机获取实时监控数据，再根据状态转移规则转化为各位置处的摊铺质量信息并存储在对应元胞中^[22]。由此将施工机械行动与摊铺质量联系起来，为路径规划提供了高精度且实时的数据源。

3.2 砾石土摊铺工艺分析 摊铺作业是指通过边界点测量、自卸汽车卸料、推土机推平的方式进行施工，最终实现整个施工单元铺料厚度和平整度均达标的作业方式。由于实际施工中仅有自卸车和推土机以及少量现场管理人员在场，因而可以假定仓面各位置处的厚度仅受自卸汽车和推土机的影响。摊铺作业中最重要的是推土机对整个仓面中土料分布的影响。选取工程中最常见的履带式推土

机作为研究对象建立其行动模型^[23]，如下所示：

$$M_{action} = \begin{cases} M_{left} & v_{left} > v_{right} \\ M_{right} & v_{right} > v_{left} \\ M_{forward} & v_{left} = v_{right} > 0 \\ M_{backward} & v_{left} = v_{right} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： M_{action} 为行进模式，可分为 M_{left} 左转弯、 M_{right} 右转弯、 $M_{forward}$ 前进和 $M_{backward}$ 后退； v_{left} 和 v_{right} 分别为推土机左右履带的转速，顺时针为正，逆时针为负。

由式(1)可知，前进后退是两条履带同向同速行进，而转弯是由于两条履带差速导致的方向偏移^[24]（一般是一条履带固定，一条履带转动的形式）。根据履带式推土机行走系统的特点可知，推土机更倾向于直行，因而在路径规划中应减少转向，尽量选择直行的运动方式。根据现场施工工艺，自卸车采用平行坝轴线进占卸料的方式，利用 20 t 自卸汽车从砾石土料场运到铺料层边缘处卸料；摊铺采用平行坝轴线进占法施工，利用推土机将料从铺料层的边缘推到未进行摊铺的低面，自卸车卸料和推土机摊铺两者同时进行。图 3 为砾石土心墙进占法施工示意图。另外，在现场施工中为节省卸料时间，常采用抬斗后前行的卸料方式，由此形成的卸料堆近似为梯形体。通过实地测量卸料堆形态参数可得出，土堆宽度与车宽相近约为 3 m，其横截面为梯形，图 4 所示为卸料过程图。

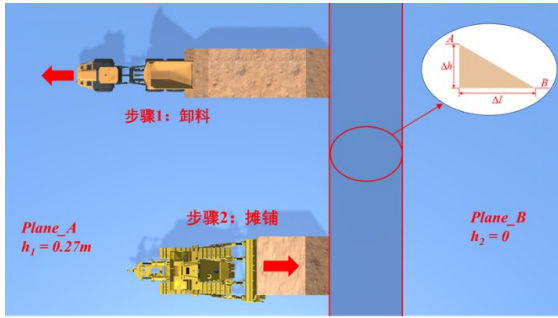


图 3 砾石土心墙进占法施工图

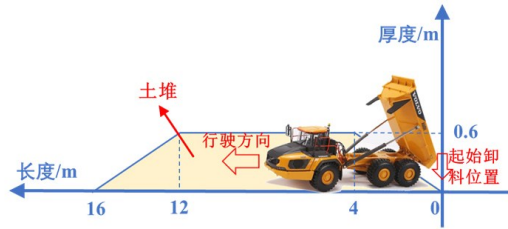


图 4 卸料过程图

3.3 摊铺作业参数实时获取 摊铺过程参数和仓面初始信息的获取是实现施工过程中质量信息的实时感知的基础。摊铺过程参数为施工过程中需要获取的实时施工信息。摊铺作业参数实时获取方法架构如图 5 所示。



图 5 摊铺作业参数实时获取

利用GPS+RTK技术，在推土机上安装监控终端，通过接收北斗，GPS，GLONASS等卫星定位系统的信号，与差分基站传回的差分定位数据耦合解算得到推土机的实时空间位置数据，此定位信息误差在2 cm以内，能够满足摊铺工艺管控的需求^[25]。此数据可用以下集合表示：

$$D_{ij} = \{x, y, H, v, t\} \tag{5}$$

式中： D_{ij} 为推土机实时空间位置数据； x 为经度； y 为纬度； H 为高程，m； v 为推土机的瞬时速度，m/s； t 为获取到定位的时间，s。

在自卸车上安装北斗定位装置以及卸料传感器等，可以感知到卸料过程，并将定位数据通过指挥机传回服务器中，以此实现对自卸车卸料位置信息的获取和传输。自卸车定位信息可用以下集合表示：

$$D_{dump} = \{x, y, H, t, S\} \tag{6}$$

式中： D_{dump} 为自卸车的定位信息， S 为自卸车状态(0为未卸料状态，1为卸料状态)^[26]。

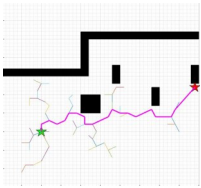
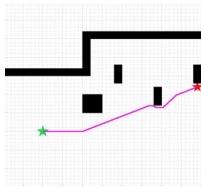
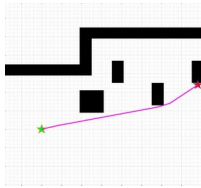
仓面初始信息为施工开始前确定的仓面基本信息。需要由现场管理人员划定施工仓面，并利用测量杆确定仓面边界点坐标，再根据碾压质量实时监控系^[27]获取前序碾压工艺的平整度情况以及平均高程情况^[28]，由此获取到施工开始前的仓面位置、大小、平整度等信息。

4 基于砾石土摊铺质量元胞自动机模型的推土机路径规划方法

砾石土摊铺质量元胞自动机模型解决了实时监控数据向全仓面质量信息转化的问题。然而依靠此模型只能做到摊铺质量信息的实时更新，无法实现对作业方式的指导。因此需要建立一套路径规划方法，以优化厚度和平整度为目标，引导推土机的行动。根据3.2节所述的摊铺工艺特点可知，推土机的作业应遵循并适合现场的进占法施工工艺，即自卸车将砾石土卸在铺料层与未铺料层交界处，再由推土机将土推向未铺料层。一般来说，推土机操作手会将一个土堆推平后寻找下一个最近的土堆再次推平。受人工经验启发，可将整个仓面的推土机路径规划分为寻找并走向最近土堆的全局静态路径规划和推平指定土堆的局部动态路径规划两部分。前者的活动区域为全仓面，因而需要考虑坝面复杂环境，避开埋设的监测仪器等障碍物，后者的活动区域为料堆附近，更关注于该区域是否完全推平，因而更多的考虑施工作业的特点，引入局部质量评价方法对其进行判定^[29]。

4.1 基于改进的A*算法的全局静态路径规划 心墙区施工环境复杂，埋设的监测仪器、与目标无关的料堆等均为在路径规划中需要考虑的障碍物，在考虑到坝面复杂环境的前提下，寻找并前往最优的卸料堆是全局性的规划问题。目前较为流行的全局路径规划算法主要有快速扩展随机树（RRT）算法^[30]、人工势场(APF)算法^[31]以及A*算法^[32]。其中各个算法的优势与缺陷如表1所示：

表1 全局路径规划算法对比

算法名称	RRT	APF	A*
优势	计算速度快；无需进行空间建模；可适应复杂约束条件	轨迹相对平滑安全；规划得到路径较短；计算速度较快	对环境反映迅速；规划结果通常为最优解;计算速度快；
劣势	概率性算法，每次计算结果不统一，难以达到较优结果	存在局部最优解，难以处理障碍物与目标较近的状况	轨迹可能较为贴近障碍物；节点较多时效率降低
示例图			

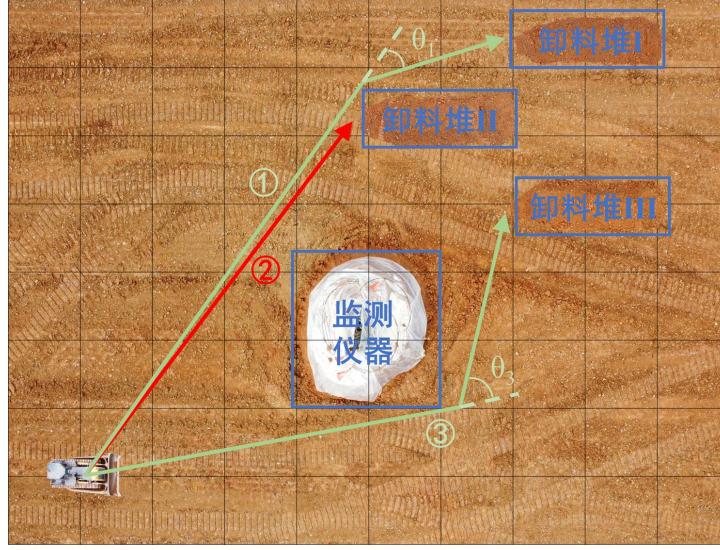


图6 基于改进A*算法的摊铺实时监控作业路径规划方法

综合考虑各种算法的优势和不足，选取A*算法并针对表1中所述的不足进行相应的改进，构造考虑坝面复杂环境的全局静态路径规划方法。经过仿真计算发现，在摊铺过程中涉及到的节点数量相对较少，A*算法降效不明显，其计算速度仍可满足现场应用的需求。对于轨迹过于贴近障碍物导致的安全问题，可通过在算法设计的过程中考虑避障安全冗余距离解决。为保证推土机可安全通过，取避障安全冗余距离为推土机车宽的一半。

由于坝面环境复杂，选择起点与各个目标点之间的欧式距离评判远近是不合理的。因而综合考虑轨迹距离与推土机行动模型，建立轨迹距离度量函数对起点与各个目标点之间的距离评判。首先，利用A*算法计算起点位置到各个目标点位置的路径并计算出各条路径的长度；其次，构建轨迹距离度量函数，综合考虑轨迹距离与推土机转弯角度、次数等，计算各条路径的转角权重距离。轨迹距离度量函数如式(7)所示：

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_n + \alpha (\sin \theta_{12} + \sin \theta_{23} + \dots + \sin \theta_{(n-1)n}) \quad (7)$$

式中： L 为转角权重距离， m ； l_1 、 l_2 、 l_n 为从起点到目标点轨迹被转弯形成的 $n-1$ 个节点分割成的 n 段轨迹的长度， m ； α 为权重系数，用来表示转角所占的权重； $\theta_{(n-1)n}$ 为 l_{n-1} 和 l_n 两段轨迹之间的夹角。

在得到各条路径的转角权重距离值后，比较多个目标点的转角权重距离值，从中优选出最优的目标点并根据A*算法计算出的路径指引推土机行动。选取施工过程中一个经典场景进行模拟，达到了良好效果，如图6所示，标红的路径即为最优路径。

4.2 基于实时质量评价的局部动态路径规划 动态路径规划主要解决的是推土机推平指定土堆的具体行动方式问题。在人工作业的过程中，操作手会驾驶推土机分多次将土堆推向未铺料层，并同时目测该区域是否推平。受人工经验的启发，将受影响区域的局部平均厚度和平整度设置为目标函数，推土机每次行进后都对这两个质量指标进行计算，以判断受影响区域是否已经平整。式(8)和式(9)分别为其厚度评价函数和平整度评价函数^[33]。当受影响区域的元胞厚度均与铺料层相近推土机将从推土状态转变为转场状态。

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{m} \quad (8)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (h_i - \bar{h})^2}{m}} \quad (9)$$

式中： $\bar{h}$ 为受影响区域元胞中摊铺厚度的平均值，m； m 为受影响区域元胞的个数； h_i 为第*i*个受影响元胞的厚度值，m； e 为受影响区域的元胞中厚度的标准差值，以此代表此区域的平整度情况。

此外，综合考虑推土机运动模型以及现场施工工艺，可以进行如下的行动循环：首先，在推土的前进过程中，考虑到推土机前铲内砾石土较多，调整方向的效果较差且容易造成局部区域过厚的情况，因此指引推土机直行；其次，在直行的过程中推土机会离开铺料层，此时意味着推土机前铲内已无土料，此时推土机的坐标高程发生变化，可以根据此变化判断推土机应该开始后退；再者，考虑到后退过程中推土机前铲的刮面作用以及方便下一次前进推土，可以根据后方元胞的厚度情况，指引推土机退向较厚的元胞；最后，当退回至较厚的区域时，直向后退直到推土机坐标与铺料层高程相近，则可以开始下一次前进推土。一次推土过程会包含多次此种前进后退操作循环，在过程中通过计算受影响区域的平均厚度和平整度是否达标来进行局部质量评价。由此形成“行动-局部质量评价-行动”的事中馈控模式，以此引导推土机推土作业。

5 工程应用

我国西南地区某高心墙堆石坝坝高 295 m，总填方量 4160 万 m³，该工程心墙为砾石土心墙，心墙区长 348 m，均宽 55.6 m。将本研究提出的方法应用于该水利工程现场，以验证本研究提出方法的有效性。在工程现场进行了两组对比实验，实验组为使用该方法完成的两次仓面摊铺作业，分别为 11.25-B 仓和 12.4-C 仓；对比组为按照原有的工作模式进行，这两次实验分别为 12.1-C 仓和 12.2-B 仓，前者由一位刚学会推土机驾驶的新手完成，后者由一位从事摊铺施工三年的熟练工完成。

5.1 实验方法及效果 以实验组的 11.25-B 仓为例分析本方法的效果，其轨迹图和图形报告如图 7 所示。可看出推土机的轨迹整体较为齐整，沿横轴方向的轨迹基本平行，此大多为局部路径规划的效果，轨迹均匀且密集，可有效将料堆推平。另外，可以看出不沿横轴方向的轨迹较少，这说明全局路径规划方法能够选择并前往较优的料堆，使得推土机在此阶段花费的时间较小，提高了摊铺施工的效率。通过观察障碍物附近的推土机行动轨迹可看出，在遇到障碍物时，全局路径规划方法可有效引导推土机避开障碍物并前往目的地。

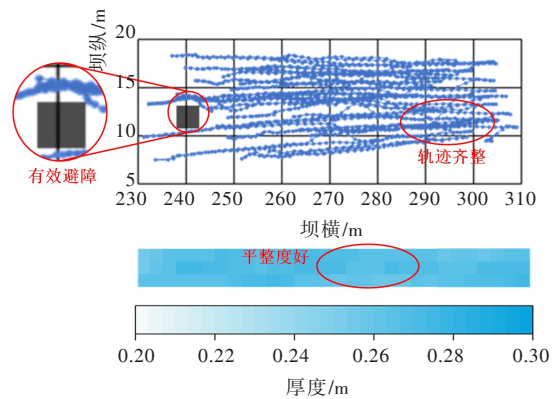


图7 基于改进A*算法的摊铺实时监控作业
路径规划应用效果

从图形报告上可看出，摊铺结束后该仓面的各位置处的厚度相近，其平均厚度和平整度均满足要求，说明了砾石土摊铺质量元胞自动机模型可有效反映摊铺质量，该路径规划方法也起到了良好的质量控制效果。

5.2 讨论 实验数据如表 2 所示，表中面积为摊铺区域的总面积，摊铺土量根据实际摊铺厚度及面积折算而来(根据现场施工要求，摊铺厚度一般为 0.27 m)，有效用时为进行摊铺作业的用时(扣除了由于自卸车卸料等导致的停车等待或避让的时间)。受现场施工进度影响，无法保证每次仓面的大小及形状固定；因此用各元胞中高程的标准差作为评价其平整度的一个指标。可以看出，在标准差方面，对比仓的标准差为 0.0956，实验仓为 0.074，相较于对比仓降低了 22.6%。另外，组内横向对比可以发现，对比组的最大值为 0.124，与其最小值 0.067 相差近一倍，而实验组之间则不存在明显差距。可以看出，利用该方法可以达到稳定并提高施工质量的目的。

图 8 为监控客户端生成的各次实验的轨迹图及其对应的图形报告，其中轨迹图上黑色方块区域为监测仪器埋设点，将其视为障碍物，图形报告上的色块颜色越深表示高程越大，反之则越小。首先，分析对比组的图形报告，可以看出，两次实验均能看到明显的局部超薄的现象，即使是标准差

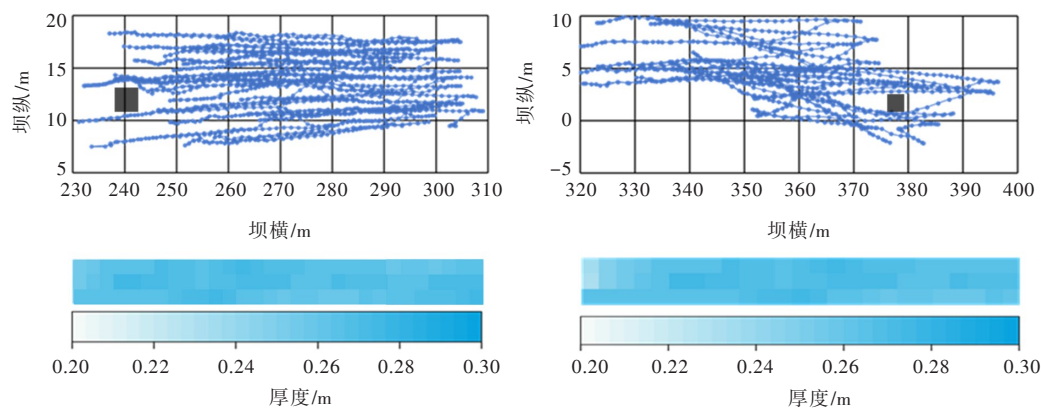
表2 实验结果

类别	名称	面积/m ²	用时/s	效率/(m ³ /s)	平均效率/(m ³ /s)	标准差	平均标准差
实验组	11.25-B 仓	990	2156	0.1286	0.1421	0.076	0.074
	12.4-C 仓	540	971	0.1557		0.074	
对比组	12.1-C 仓	1071	2627	0.1101	0.1317	0.124	0.0956
	12.2-B 仓	768	1353	0.1533		0.067	

注：加粗的值为最优的平均效率与平均标准差。

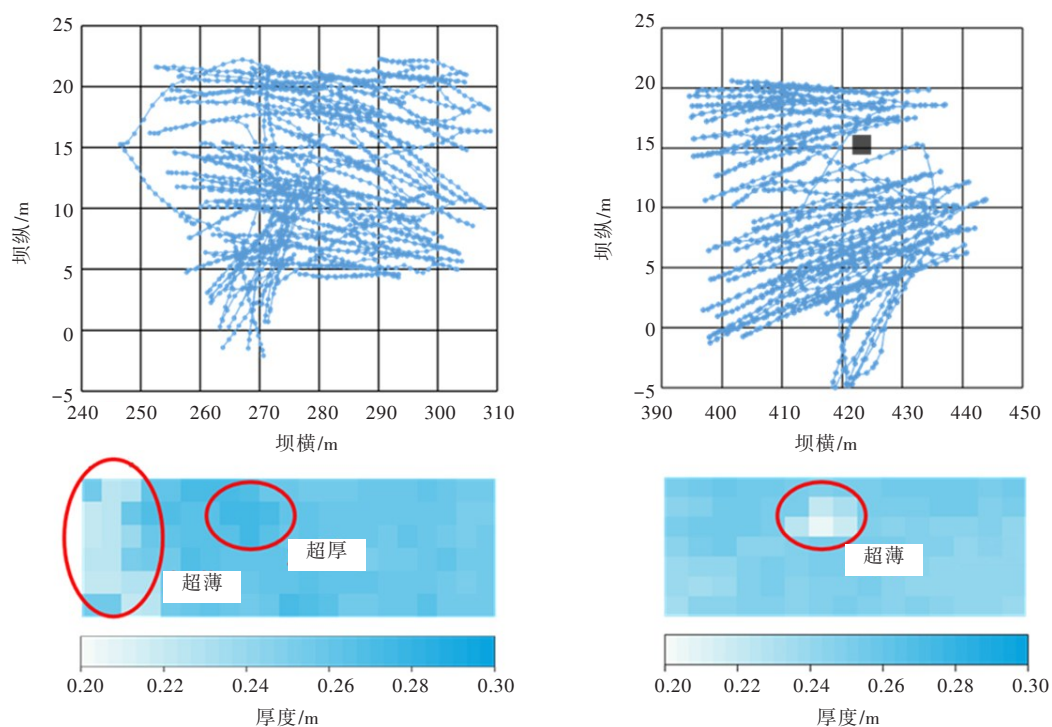
仅为0.067的12.2-B仓，也存在局部超薄的现象。再对实验组的图形报告进行分析，可以看出摊铺较为均匀，没有局部超薄的情况发生。可以看出，利用该方法可以有效控制摊铺的平整度，避免超薄现象的发生。

对比两组的轨迹图可以发现，实验组轨迹图相对均匀且密集，可有效避开障碍物且能够选择较优的路径；由于程序中设置了推平一个土堆再进行全局路径规划的策略，因而可以根据轨迹的密集



(a) 11.25-B路径规划方法实验仓

(b) 12.4-C路径规划方法实验仓



(c) 12.1-C人工经验对比仓

(d) 12.2-B人工经验对比仓

图8 各次实验轨迹图及厚度图形报告

程度大致推断土堆位置等信息。另外,实验组的轨迹末端均有向下或向上弯折的现象,原因在于程序中设计了依据GPS数据中高程的变化来确定推土前进及后退的逻辑,从而在现场实验时推土机下坡及上坡的过程中出现了车身不平的情况。由于摊铺为沿水平轴进行,与此相交的均为通过全局路径规划得到的寻找最优土堆的路径,故该路径基本均为直线。综上所述,实验组是按照路径规划的指示进行全局静态路径规划和局部动态路径规划的,且可达到良好效果。对比组则与实验组差距较大,两次之间有着较大的区别,12.2-B仓轨迹相对齐整,但由于中心地区存在较少覆盖到的区域,造成了局部超薄现象的出现,12.1-C仓由新手完成,其轨迹较为混乱无规律,这也造成了其平整度和效率上的低下。

另外,本控制方式在效率方面也有较好表现。对比组效率最低为 $0.1101\text{ m}^3/\text{s}$,最高为 $0.1533\text{ m}^3/\text{s}$,熟练操作手的效率比新手高了四分之一以上,而实验组之间差距相对较小:效率最高为 $0.1557\text{ m}^3/\text{s}$ 与最低值 $0.1286\text{ m}^3/\text{s}$ 相差约六分之一。横向对比可发现,实验组的平均效率对比组更高,因此,该方法可将效率保持在中等偏上水平,在保证施工效率的前提下,起到提高并稳定施工质量的作用。

6 结论和展望

摊铺施工的有效管控对于砾石土心墙堆石坝施工具有十分重要的理论与现实意义。本文提出了一种基于元胞自动机与改进A*算法的砾石土摊铺实时监控作业路径规划方法,主要取得以下成果:

(1)根据摊铺作业过程特点,建立了砾石土摊铺质量元胞自动机模型,将实时监控数据转化为摊铺质量信息并储存,从而实现全仓面摊铺质量信息的实时更新。

(2)耦合现场施工工艺和施工经验,提出了考虑坝面复杂环境和施工作业特点的混合路径规划方法,通过基于改进的A*算法的全局静态路径规划方法解决了避障及寻优的问题,并通过面向质量评价的局部动态路径规划方法解决了推平指定区域的问题。

(3)现场实验表明,该方法可在保证施工效率的前提下,将摊铺厚度控制在 0.27 m 左右且有效地避免了超厚超薄现象的发生,平整度相较人工提高了 22.6% 。该方法能够有效监控和指导摊铺施工,实现了摊铺作业的智能化管控,有效减少了人工经验的影响。

致谢:王佳俊对本文的贡献与第一作者相同。

参 考 文 献:

- [1] 钟登华,时梦楠,崔博,等.大坝智能建设研究进展[J].水利学报,2019,50(1):38-52,61.
- [2] CHANG G K, MOHANRAJ K, STONE W A, et al. Leveraging intelligent compaction and thermal profiling technologies to improve asphalt pavement construction quality: a case study[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(26): 48-56.
- [3] 虞将苗,陈富达,彭馨彦,等.高韧超薄沥青磨耗层在港珠澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(1):48-56.
- [4] 刘东海,夏谢天.基于便携测温测厚仪的沥青摊铺质量可视化实时管理[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):438-444.
- [5] 钟登华,崔博,吴斌平,等.一种心墙堆石坝摊铺施工质量实时监控方法[P].天津:CN106869141A,2017-06-20.
- [6] ZHONG D, DU R, CUI B, et al. Real-time spreading thickness monitoring of high-core rockfill dam based on K-nearest Neighbor Algorithm[J]. Transactions of Tianjin University, 2018, 24(3): 282-289.
- [7] LIAN Y, GAN Z, YU C, et al. A cellular automaton finite volume method for microstructure evolution during additive manufacturing[J]. MATERIALS & DESIGN, 2019, 169(107672).
- [8] MCCASKILL J S, PACKARD N H. Analysing Emergent Dynamics of Evolving Computation in 2D Cellular Automata, Cham, 2019[C]//Springer International Publishing, 2019.

- [9] ZHENG Y, LI X, ZHU N, et al . Evacuation dynamics with smoking diffusion in three dimension based on an extended Floor-Field model[J] . Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 507: 414-426 .
- [10] ROODPOSHTI M S, ARYAL J, BRYAN B A . A novel algorithm for calculating transition potential in cellular automata models of land-use/cover change[J] . Environmental Modelling & Software, 2019, 112: 70-81 .
- [11] WU J, LI R, DING R, et al . City expansion model based on population diffusion and road growth[J] . Applied Mathematical Modelling, 2017, 43: 1-14 .
- [12] 尹灵芝, 朱军, 王金宏, 等 . GPU-CA 模型下的溃坝洪水演进实时模拟与分析[J] . 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(8): 1123-1129 .
- [13] KHATIBI A, POUREBRAHIM S, BIN MOKHTAR M . Simulating carbon sequestration using cellular automata and land use assessment for Karaj, Iran[J] . SOLID EARTH, 2018, 9(3): 735-744 .
- [14] 孙玉泽 . 无人轮式车辆越野路面全局路径规划与轨迹跟踪[D] . 长春: 吉林大学, 2020 .
- [15] WANG N, XU H . Dynamics-constrained global-local hybrid path planning of an autonomous surface vehicle[J] . IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 6928-6942 .
- [16] 刘好 . 基于优化 Astar 与 MPC 的自动驾驶车辆路径规划研究[D] . 南京: 东南大学, 2019 .
- [17] 侯永宏, 刘艳, 吕华龙, 等 . 一种基于双目视觉的无人机自主导航系统[J] . 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(12): 1262-1269 .
- [18] 时梦楠, 崔博, 王佳俊, 等 . 复杂施工条件下无人碾压机群协同全覆盖路径规划研究[J] . 水利学报, 2020, 51(12): 1544-1557 .
- [19] 钟登华, 鄢玉玲, 崔博, 等 . 考虑压实质量影响的碾压混凝土坝层间结合质量动态评价研究[J] . 水利学报, 2017, 48(10): 1135-1146 .
- [20] 张鹏 . 基于元胞自动机的城市主干路多车交互换道模型[D] . 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019 .
- [21] GHOSH M, KUMAR R, SAHA M, et al . Cellular Automata and Its Applications[Z] . 2018: 52-56 .
- [22] WANG J, ZHONG D, ADELI H, et al . Smart bacteria-foraging algorithm-based customized kernel support vector regression and enhanced probabilistic neural network for compaction quality assessment and control of earth-rock dam[J] . EXPERT SYSTEMS, 2018, 35(e123576) .
- [23] 蒋充剑, 韩海良, 翟永翠 . 基于 Unity 3D 的推土机模拟训练平台设计[J] . 中国工程机械学报, 2017, 15(6): 517-521 .
- [24] 贺宁亚 . 高速履带式推土机行走系统仿真与履带板分析[D] . 长春: 吉林大学, 2017 .
- [25] 林威伟, 钟登华, 胡炜, 等 . 基于随机森林算法的土石坝压实质量动态评价研究[J] . 水利学报, 2018, 49(8): 945-955 .
- [26] 王晓玲, 陈文龙, 戴林瀚, 等 . 基于北斗系统水电工程坝料运输过程实时监控系统和方法[P] . 天津: CN108417017A, 2018-08-17 .
- [27] ZHONG D, LIU D, CUI B . Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J] . Science China-technological Sciences, 2011, 54(7): 1906-1913 .
- [28] 钟登华, 沈子洋, 王佳俊, 等 . 基于实时监控的混凝土坝振捣施工质量动态评价研究[J] . 水利学报, 2018, 49(7): 775-786 .
- [29] 吕吉冬 . 考虑车辆动力学的智能车局部路径规划方法研究[D] . 长春: 吉林大学, 2020 .
- [30] 张卫波, 肖继亮 . 改进 RRT 在复杂环境下智能车路径规划中的应用[J] . 中国公路学报, 2020: 1-16 .
- [31] 刘冰雁, 叶雄兵, 方胜良, 等 . 基于 Frenet 和改进人工势场的在轨规避路径自主规划[J/OL] . 北京航空航天大学学报: 1-12[2020-11-09] . <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0169> .
- [32] 岳秀, 张超峰, 张伟, 等 . 基于 A-Star 和改进模拟退火算法的航迹规划[J] . 控制工程, 2020, 27(8): 1365-1371 .
- [33] 王佳俊, 钟登华, 吴斌平, 等 . 基于概念漂移检测的土石坝压实质量评价模型更新研究[J] . 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(5): 492-500 .

Path planning of gravel soil paving based on cellular automata and improved A* algorithm

JIAO Zheng, WANG Jiajun, WANG Xiaoling, CUI Bo, TONG Dawei, GUAN Tao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Gravel paving is an important part of the construction of core rockfill dams, and its thickness and flatness are key indicators to characterize the paving quality. However, the existing paving operation path planning highly relies on manual experience and has the disadvantage of strong subjectivity, so it is difficult to effectively control the paving quality. Aiming at the above problems, this research proposes a path planning method for paving gravel soil based on cellular automata and improved A* algorithm. This method optimizes the selection of the global path by improving the trajectory distance measurement function in the A* algorithm and introducing the obstacle avoidance redundant distance. At the same time, it combines the quality evaluation function to optimize the local dynamic path planning method, so as to realize the global-local hybrid path planning of the paving operation. In addition, by establishing a cellular automata model for the paving quality of gravel soil, the real-time monitoring data of the construction machinery is converted into the quality information of each grid of the working surface, so the quality information can be updated in real time. Engineering application shows that the method proposed in this study can control the paving thickness at about 0.27 m on the premise of ensuring construction efficiency, effectively avoiding the occurrence of ultra-thick and ultra-thin phenomena, and the flatness is improved by 22.6% compared with manual work.

Keywords: gravel soil paving; cellular automata; hybrid path planning; A* algorithm; real time monitoring
(责任编辑: 李福田)

(上接第 202 页)

A review on the mechanism of nitrogen loss and its effected factors in the open nature water

YANG Zhengjian^{1, 2}, WEI Chenyu¹, LIU Defu^{1, 2}, JI Daobin¹, MA Jun², WANG Congfeng¹

(1. Hubei Observation and Research Station of Three Gorges Reservoir Ecosystem,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In China, nearly 100,000 reservoirs of various types have been built, which changed the original hydrodynamic and biogeochemical conditions of rivers, affecting the material, energy, chemical and biological fields of water bodies. However, it is still unclear whether the reservoirs reduce water purification function or strengthen the water decontamination capacity. In this study, some researches on nitrogen removal in natural open water areas were summarized and found that (1) Anaerobic denitrification, anaerobic ammonium oxidation, aerobic denitrification and anaerobic methane oxidation are four typical processes of denitrification of open water body; (2) nitrogen removal could happen mainly in some anaerobic areas, such as hyporheic zone, sediment layer, oxygen minimum zone and suspended particle; and (3) dissolved oxygen (DO), carbon-nitrogen ratio (C/N), nitrate concentration (NO_3^-), temperature and pH are the direct factors affecting the efficiency of denitrification in open water. Based on those above, four suggestions were given in this paper for further researches on the effects of reservoirs on nitrogen removal, which contained continuous monitoring of different nitrogen formation and calculation of nitrogen load balance, the in-situ methodology on denitrification mechanism of different carriers in reservoirs, and the denitrification mechanism and nitrogen removal flux in reservoirs and comparative research on the nitrogen removal efficiency between natural rivers and reservoirs.

Keywords: nitrogen removal; hyporheic zone; sediment layer; oxygen minimum zone; suspended particle; reservoir

(责任编辑: 杨 虹)