

【比较与借鉴】

PISA2024 科学素养测评框架评述与启示

黄兴娟 林长春 首新

【摘要】经合组织 2021 年 3 月发布的《PISA2024 科学的战略愿景和方向》为 PISA2024 科学素养评估提供了框架。该框架扩展了“评价与设计科学探究”和“科学解释数据和证据”两个现有能力,增加了“利用科学知识进行决策和行动”“运用概率思维”两个新的能力;引入了“社会环境系统和可持续性”“科学知识的发展及其滥用”“信息学”三个新的知识领域;补充了“科学认同”新维度,它包含科学资本、批判性科学意识、包容环境的科学经验和实践、伦理和价值观四个子维度。该文件对 2024 年及以后的学生在科学学习和科学经验中应该具备的知识、能力和认同等提出了愿景,构建了清晰的科学素养测评模型和操作性较强的指标体系,将会对未来评估青少年科学素养产生影响。

【关键词】PISA2024;科学素养测试框架;科学认同

【作者简介】黄兴娟,重庆师范大学初等教育学院硕士研究生;林长春,重庆师范大学科技教育与传播研究中心教授;首新,重庆师范大学科技教育与传播研究中心副教授(重庆 400700)。

【原文出处】摘自《考试研究》(津),2022.4.52~61

【基金项目】重庆市教育科学“十三五”规划 2020 年度规划重点课题“科学教育专业本科生 STEM 课程整合能力及其培养研究”(编号:2020-GX-010);重庆市社会科学规划一般项目“青少年科学素养测评体系开发及应用研究”(编号:2021SZ13)。

一、PISA2024 发展背景

国际学生评估项目(Program for International Student Assessment,简称 PISA)是经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development,简称 OECD)发起的一项三年一次的国际调查,旨在测试即将结束义务教育的 15 岁学生的技能和知识,评估他们将所学知识应用到现实生活的能力。到目前为止,PISA 已经开展了 7 次科学素养测评。2000 年、2003 年按照“过程、知识、应用”三个维度对科学素养进行了评估。2006 年第一次把科学素养作为主要领域进行评估,包含情境、态度、知识、能力四个维度,此后一直沿用这四个维度对科学素养进行评估。2021 年 3 月 OECD 颁布了《PISA2024 科学的战略愿景和方向》(PISA 2024

Strategic Vision and Direction for Science),指出了 PISA2024 评估框架的主要内容,预计 2024 年将按照科学情境、科学态度、科学知识、科学能力、科学认同五个维度进行评估。

在 PISA 第 46 次会议上,PISA 理事会(PISA Governing Board,简称 PGB)对 PISA2024 的时间进行了全新规划,决定将开发时间从一年增加到两年,PISA2024 评估推迟到 2025 年^[1]。

二、PISA2024 科学素养测评框架内容

当前科学教育的主要缺陷在于过多强调学习内容和记忆知识,忽视了更高层次的认知技能和更广泛的科学素养。有学者指出,目前科学教育并没有培养学生成为具有科学素养的积极公民,也未能让学生为未来工作做好充分准备^[2]。OECD 以现有

文献为基础归纳了科学素养的核心要素,提供了更完善的框架。

(一) 概念框架

随着时代的进步,PISA也在不断更新学生应该具备的科学素养,以帮助他们适应未来的生活。2000年PISA将科学素养定义为运用科学知识来界定问题,具备基于证据得出结论的能力^[3];2006年PISA将科学素养定义为掌握科学知识,运用科学知识确立科学问题,解释科学现象,运用科学证据,理解科学探究的能力^[4];PISA2015将科学素养定义为培养学生科学地解释现象、数据及证据的能力,得出正确结论的能力,评估并设计科学探究的能力^[5]。由此可见,PISA对于科学素养的定义反映了时代对学生应当具备的科学素养的要求变化,更加关注学生能否运用科学知识,是否发展了科学思维。PISA2024也延续了这个特点,在科学素养的测评中更加注重信息学和社会环境方面的知识,重视学生理解、处理数据的能力,关注学生是否思考、学习、理解、参与科学。新框架增补了许多要素,对2024年及以后的学生在科学学习和科学经验中应该具备的知识、能力和认同等提出了愿景,为科学素养的测评提供了宝贵的基础。

(二) 核心要素

OECD提出PISA2024科学素养测评框架将围绕科学情境、科学态度、科学知识、科学能力、科学认同五个维度来进行测评,其中每一个维度都对科学素养进行了一定程度的体现。科学情境和科学态度沿用PISA2015的内容。科学情境包含个人的、本土/国家的、全球的,试题背景主要围绕健康与疾病、自然资源、环境质量、危害、科学和技术前沿等方面进行设定。科学态度包括对科学的兴趣、重视科学探究方法、环保意识三个方面,着重于测评学生是否拥有对科学和科学问题的好奇心,是否具备基于证据进行科学探究的能力。增补维度的具体内容如下。

1. 科学知识

PISA2024在知识领域保留了PISA2015的“内容性”“程序性”“认知性”知识,增加了“社会环境系统和可持续性”“科学知识的发展及其滥用”“信

息学”三个新的子维度进行评估。

“社会环境系统和可持续性”(Socio-Environmental Systems and Sustainability)侧重于测评学生使用新领域知识和新思维解决系统复杂问题的能力,评估他们是否了解系统内部和系统之间的相互作用。主要包括了三个要素:(1)科学是了解人类世界的有力工具,用于反映学生对科学知识的共鸣,理解到科学知识与他们的生活息息相关;(2)新领域知识出现需要学生接触新的思维和行动方式,用于反映学生解决复杂问题是否使用到了自然科学、社会科学和工程科学等新领域的思维方式,确保他们能为未来做好准备^[6];(3)学生要具备识别复杂系统要素的能力,认识到系统内容及其系统之间的相互作用,用于反映学生对于系统的把控能力。

“科学知识的发展及其滥用”(The Development of Scientific Knowledge and Its Misuse)侧重于让学生了解科学知识的发展情况,并批判性地看待科学,评估学生辨别是非、依据证据做出决策的能力。主要包括了两个要素:(1)学生应正确理解科学知识并合理看待错误的科学知识,用于测评在信息庞杂的碎片化知识时代,学生是否具备分辨知识正误的能力,是否具备通过可靠的方法(如从科学史入手研究、同行评审等)证明知识错误的能力;(2)了解经济和政治因素如何影响科学决策,用于测评学生在科学知识商业化(技术和创新促进科学知识盈利)的趋势下,学生是否了解做出重要决策的种种原因。

“信息学”(Informatics)侧重于测评学生的数字和数据素养,良好的数字和数据素养能够促进学生充分理解并参与数字世界的发展,推动公平、公正和安全的数字社会的形成^[7]。主要包括了两个要素:(1)在自然和计算机方面有相应的信息基本知识,用于评估学生提取信息并采取行动的能力,帮助他们成为数字世界的积极参与者,游刃有余地面对变化的信息化环境;(2)具备数字和数据知识,包括熟悉数据表示的不同模型、基本计算模型和算法、实验室实验数据处理的能力,用于测评学生研究、解释和使用数据方面的流畅性和准

确性。

未来社会将会是一个包括了政治、生态、经济、能源供应、环境健康等复杂要素的庞大体系,科学知识测评维度充分考虑到了未来社会发展的方向。除了测评学生应掌握的内容性、程序性、认知性知识,PISA2024还考虑到了未来社会发展中容易出现的种种社会化科学问题,运用新领域知识解决复杂系统之间的问题;批判地看待科学知识,理解科学决策的制定原因,避免科学知识的发展与滥用;加强信息学技能,为数字化时代做好充足准备。

2. 科学能力

科学能力测评维度相较于PISA2015进行了大幅度的更新,更加强调学生在复杂系统中处理和运用数据的能力,以及在庞大信息中做出决策的能力。在能力领域保留了PISA2015的“科学地解释现象”,扩展了“评价和设计科学探究”“科学地解释数据和证据”两个现有能力,增加了“利用科学知识进行决策和行动”“运用概率思维”两个新的能力。

“评价和设计科学探究”(Evaluate and Design Scientific Enquiry)在于评估学生提出科学问题、设计和评价探究方法、钻研信息的能力。相比于PISA2015,PISA2024在该维度主要新增了两个要素:(1)理解复杂系统中的设计,要求学生从微观和宏观两个层面观察和理解系统,从而识别出新出现的现象、物理反应和行为,该要素旨在测评学生在复杂系统中研究信息、设计活动和处理数据的能力。(2)分析、评估信息,该要素旨在测评学生是否知道复杂元素之间的相互作用,能否预测系统内的行为,进行风险评估。要做到这一点,需要学生能够识别问题的基本要素,对科学工作的质量和科学决策的有效性作出评价性判断,特别是要在众多科学信息中辨别伪科学与非科学。

“科学地解释数据和证据”(Interpreting Data and Evidence Scientifically)维度在于评估学生表达、分析、解释、处理数据及通过数据进行决策的能力。在PISA2015的基础上新增了三个要素:(1)区分真假数据的能力,要求学生能够区分网络数据的真伪性。Calude等人也认为在通过科技工具查询大型

数据的时代,学生应该注意大数据中随机性、虚假性的伪科学产物^[8]。(2)具备使用基本数据工具的能力,如采用直方图、均值图等来对数据进行有意义的表示。(3)具备对数据做出判断的能力,以利用科学知识进行决策和采取行动。

“运用科学知识进行决策和行动”(Using Scientific Knowledge for Decision-making and Action)旨在测评学生运用科学知识创造性解决问题的能力。包括三个要素:(1)“运用科学知识进行决策”,要求学生多角度考虑多方面因素,判断科学问题形成的不同原因,以及这些原因在多大程度上是由科学、社会、经济和政治层面造成的^[9]。通过多角度的考虑,学生能理解科学背后的其他因素,有利于他们更好地处理复杂系统中的问题。(2)“关注科学伦理”,要求学生在做决策的时候思考该决策是否符合道德与价值观,有助于学生具备良好的道德品质。(3)“创造性地解决问题”,旨在测评学生驾驭生活的决策能力和创造新价值的的能力。这种能力对于改善我们的社会至关重要,学生要用一系列的策略来解决问题,思考哪些有效,哪些无效,这样,当他们面对不确定性和变化的问题时,会变得更更有准备并游刃有余。

运用概率思维(Using Probabilistic Thinking)在于测评学生是否意识到所有的活动都有与之相关的风险,是否具有理解风险含义并解释风险概率的能力。包括五个要素:(1)有意识地运用“概率断言”(Probabilistic Assertion)的思维来判断事物,即先假设表达式结果为真,然后通过相关的证据来证明,若证明不为真则断言失败。学生需要理解到事物的发生与结果之间存在错误的概率,如此一来,能让学生在科学学习过程中接受自己的错误,另一方面也能促进他们利用新证据建立新立场,积极改正。(2)解释误差的可信度,要求学生在问题解决的过程中,能够大概估计出实验数据中存在误差的来源,认识到科学探究的局限性,以批判性的眼光看待研究结果。(3)认识到所有科学学习活动都有与之相关的风险,并能够准确解释风险统计数据及其含义。有研究表明,理解概率的不确定性和风险是我们所有人面临大多数科学问题的主要特

点^[10-11]。因此,学生需要理解到风险是人生不可避免的固有特征,并学会用概率思维对科学活动做出判断,以此来促进他们更加自如地面对当今世界发出的种种挑战。(4)理解正态分布的概念以及均值和中位数之间的差异,促进学生对统计数据做出评估性判断,并在大型数据中准确地找到数据的相关性,以此来提高学生对科学数据的处理运用能力。(5)做出预测。要求学生基于已有科学数据能进行合理分析,并做出适宜的科学推断。

3. 科学认同

科学认同(Scientific Identity)是科学学习、获得成就和参与的关键,它决定了学生思考、学习、理解和参与(或不参与)科学的程度^[12]。这是 PISA2024 测评的一个全新维度,包含“科学资本”“批判性科学意识”“包容性的科学经验和科学实践”“伦理与价值观”四个子维度。

“科学资本”(Science Capital)是指一个人所具有的科学相关资源,侧重于评估学生对科学态度、科学素养、科学能力的理解,是否在行为、社会交往方面对科学产生了认同感^[13]。包括五个要素:(1)认为科学与自己未来生活息息相关。大量证据表明,科学资本在塑造年轻人“认为科学和自身相关”程度方面起着关键作用,并与16岁后的科学抱负和进步显著相关^[14-15]。同时,它还与工程、数学和技术领域的态度和抱负有关^[16]。(2)在科学认同的过程中得到其他成员的充分鼓励。(3)了解科学知识的通用性,知道当前和未来生活所需要的通用工作能力。(4)在课堂之外的生活中参与科学,成为科学的关键消费者和生产者,并利用科学为个人/社会利益服务。(5)拥有与科学相关的社会资本。

“批判性科学意识”(Critical Science Agency)旨在测评学生能否利用科学知识,并结合多学科知识批判性地看待社会科学问题^[17-18]。具体包括六方面:(1)以各种方式利用科学学习经历创造价值,关注科学与社会、环境发展中的不平衡方面。(2)利用科学方法解决问题,指的是学生积极参与生活社区,在生活体验中解决日常问题。(3)成为科学关键消费者和生产者,即拥有使用科学并创

造科学的能力。(4)意识到科学的衍生社会属性,如科学身份、科学文化、科学经验等会得到重视和尊重。(5)了解古往今来科学事实面临的错误情况,以及这样的错误如何一点点地被推翻。(6)能够将科学作为智力工具的一部分,即运用科学来开发智力。

“包容性的科学经验和科学实践”(Inclusive Science Experiences and Practices)旨在评估学生因种族、阶级、宗教、经验背景等方面所具备的科学知识、能力的差异。包括四个要素:(1)让学生从多样化的资源中,包括教育资源、材料资源、数字资源、科学机会、环境和经验等,进行有效的科学学习。(2)体验包容性科学学习环境,感受不同社会群体对科学的贡献。(3)把面对广泛而多样的科学知识、历史上科学家的科学思想等活动作为日常科学学习的一部分。(4)让他们感觉到安全、受尊重、受重视并融入科学。该维度的测评,能让学生从资源、机会、背景和经历等视角体验包容性的科学环境,进而感知科学事业受尊重、受重视。

“伦理与价值观”(Ethics and Values)指学生要了解与科学知识、方法、科学实践和科学成果有关的伦理,树立正确的科学研究观念,认识科学发展的社会属性,激发15岁青少年从事科学事业来推进社会发展。

(三)要素关系

基于上述五个维度,PISA2024 科学素养测评框架模型如下页图1。该框架建立在 OECD 科学素养测评战略咨询专家组的成果基础上,展示了五个维度之间的关系。第一,情境维度是评价在特定情境下的科学知识和能力。个人的、当地的/国家的、全球的情境都可激发学生运用相关知识解决科学问题的能力。第二,科学认同和科学知识、科学能力相辅相成,科学认同是科学知识和能力的组成部分,也是影响科学知识和能力的表现形式、实现程度的关键因素,与知识和能力同等重要。第三,科学认同维度强调个体主观对科学的认知与判断,而科学知识和能力更多是了解客观事实、运用技术手段等方面的内容。第四,科学认同与科学能力之

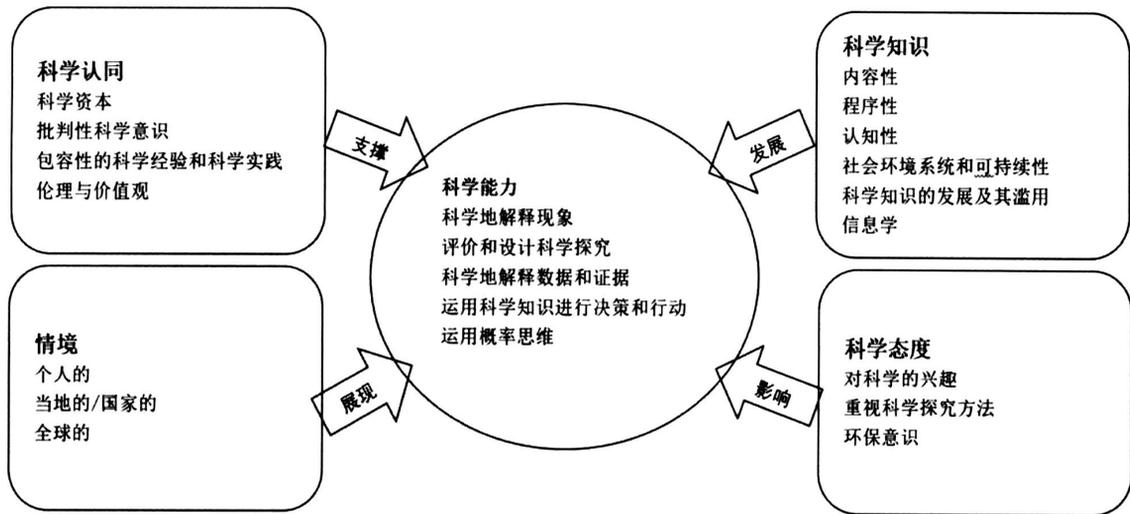


图1 PISA2024 科学素养测评框架关系图

间的子维度相辅相成。科学认同中的“批判性科学意识”就涉及科学能力中的“利用科学知识进行决策和行动”，科学知识为批判性思考提供充分的理论依据，决策和行动源于批判性思考后的想法，两者互相促进，协同共生。PISA2024 认为科学认同是影响科学知识和能力实现程度的关键因素，将科学认同与科学知识和科学能力并驾齐驱，同时把这三个维度描述成所有 15 岁青少年应达到的目标维度。该战略为 2024 年及以后的学生在学习科学以获得科学经验中应该具备的知识、能力和认同等提出了愿景，为科学素养模型建构、命制试题及制订评分标准提供了可操作的指标体系。

三、PISA2024 科学素养测评框架的新特点

PISA2024 对科学内容、过程、态度、习惯等进行了多维度的设计，而不是狭义定义主题知识或基于课程的材料。通过对 PISA2024 科学素养测评框架的分析，可以进一步明确要素之间的关系，从而明晰 PISA2024 科学素养测评的新特点。

(一) 构建了多维度、全方位、多视角的科学素养框架

相比于 PISA2015 的框架，PISA2024 新框架在结构和内容上有了明显的增补。首先，新框架不仅仅评估学生的内在科学素养，还考虑到了影响学生科学素养的外在因素，如家庭、学校、社会等，意图全方位了解科学素养及其影响因素。其次，新框架强调多视角地看待生活中的复杂的科学问题。这

就要求学生整合政治、经济、文化等各方面的知识，从跨学科的角度来尝试解决复杂科学问题，明确科学的社会责任。最后，PISA 将学生学习成果数据、背景和学习态度数据、影响学生校内外科学学习的关键因素数据联系起来评估学生的科学素养水平，以此总结出表现较好的学校和教育系统的特点，使各国能够监测其在实现关键科学学习目标方面的进展。PISA2024 带来了一个全面的科学素养测评框架，可以预期，它将引领未来科学素养测评的方向。

(二) 建构科学认同维度，增强学生科学认同感

科学认同代表着学生对科学的认同感。PISA2024 的科学认同维度旨在测评学生是否思考、学习、理解和参与科学及其程度。该维度为学生、同龄人、教师和家长提供了一种相互联系的学习方法，共同促成学生学习并获得科学成果，成为科学的关键使用者和生产者。科学认同体现为学生能够通过这种相互联系的学习方法关注周围的科学事务，从而感觉到科学是有益且有用的，进而增进对科学的认同。当然，除了增强认可，认同维度也要测评学生是否批判性地看待科学现象、是否辩证地分析科学知识、是否体会到自己参与科学活动的意义等。

不难推断出，科学认同是新框架的基础，是影响科学知识和能力实现的关键因素，它在调节科学学习和理解方面起着重要作用。如果没有注意到

学生的科学认同结果,那么就有可能破坏其科学学习的成就和潜力,降低学生在生活中批判性地运用科学的频率。因此,PISA2024 建议,科学认同这一维度需要被视为当代学生为未来科学做准备的核心维度。

(三)关注跨学科思维,基于真实情境解决复杂科学问题

现实生活中的复杂问题要求学生具有更加宽广的科学知识,采用跨学科的思维来解决问题。PISA2024 在“社会环境系统和可持续性”中明确指出,解决世界中复杂的科学问题需要采用跨学科的思维,“信息学”维度也指出要将信息学作为获取跨学科知识的方法;“运用科学知识进行行动和决策”部分强调学生需要具备多角度、多方面考虑问题的能力,运用跨学科的方法来解释生活世界。可见,PISA2024 非常关注对学生跨学科思维的评估,要求学生考虑导致特定科学事件发生的不同原因,以及这些原因在多大程度上是由科学、社会、经济和政治层面造成的。

有学者指出,跨学科的测评不能局限于学科内部的知识,而是要围绕着情境和任务将不同学科间的知识关联起来,关注不同学科知识的网络建构^[19]。当学生在特定的情境和任务下能够游刃有余地把所学的知识迁移到实际问题解决中,他们就被认为具备一定水平的科学素养^[20]。PISA2024 在设计科学测评试题时,构建了真实的问题情境,如全球面临的气候变化、流行病、粮食安全等复杂问题,以解决社会中的科学问题为导向,同时与学生的日常活动、经历、体验相联系,以激发学生利用跨学科思维来解释我们的世界。跨学科思维能够让学生更快地适应复杂系统,引导他们统整科学知识、技能、态度从而对特定情境做出有效回应。

四、思考和启示

PISA2024 科学素养测评框架将掀起全球科学素养评价和教学的新浪潮,科学教育已然超越一个学科应有之范式,与信息技术、STEM 教育理念、科学认同交织在一起,为全面发展学生的科学素养提供了有效的操作指南,在“以评促发展”理念下,该

测评框架为我国义务教育阶段科学教育质量监测及相关科学教学活动提供了有益的启示。

第一,要重视将科学伦理渗透到科学素养测评之中。科学伦理是指人应具备的符合科学准则的品格和行为,还包括对自身价值观和行为的反思^[21]。PISA2024 科学素养测评框架从是否应该做、应该怎样做等两方面评估学生的科学伦理观。如在科学研究和成果应用技术不断发展的时代,学生需要思考是否应该发展纳米技术?以及怎样发展纳米技术才会更安全?科学伦理重在评估学生在面对种种问题时,要经过多方考量后做出符合主流道德和科学价值观的决定,并且期望他们能在生活中始终如一地运用这样的价值观。我国义务教育阶段科学教育质量监测框架主要还是能力导向的测评,对相关影响因素的分析也限于课程开设、条件保障、教师配备、学校管理等外部因素,缺乏对中华民族文化洗礼下学生科学伦理的关注^[22]。在科技快速发展及碎片化时代,我们也应跟上时代的步伐,促进科学伦理精神成为现代科学技术活动主题的自觉追求,将科学伦理与科学能力并行,确保青少年树立正确的科学伦理观。

第二,要有意识地在科学教学中渗透科学认同感。科学认同的社会价值已得到越来越多的关注,《PISA2018 全球胜任力框架》中就提出了对民族文化和身份的认同、对人类尊严和多元性价值的认同^[23]。PISA2024 科学素养测评框架将科学认同视为当代学生为未来从事科学事业做准备的核心要素,从对科学本身的认同、批判性意识、环境认同和价值认同等四个方面阐明其在鼓励学生参与社会事务、成为有社会责任感的公民中的积极意义。目前我国科学教育已从强调学习内容和记忆知识转向让学生从科学探究之中发展各项能力,但对科学教学中渗透科学认同教育仍认识不足,教师应有意识地通过科学探究活动培养学生的科学认同感。

第三,重视科学探究中数据处理与分析的概率思维。概率思维是学生使用概率知识进行问题解决的一种高阶思维,表现在学生根据现象或实验进行合理解释的过程中^[24]。PISA2024 新增“运用概

率思维”能力维度,旨在要求学生能基于概率统计正确处理信息、分析问题,并做出合理的决策。在STEM跨学科教育理念下,科学探究活动中,特别是在数据、信息处理和分析阶段,应积极融入概率思维,建立分析模型,加速信息的处理,快速厘清信息之间的逻辑关系,以做出合理的预测和适宜的推断。

参考文献:

[1] OECD. Programme for The International Student Assessment: PISA 2024 Background Document [R]. Paris: OECD Publishing, 2021.

[2] OECD. PISA 2024 Strategic Vision and Direction for Science [R]. Paris: OECD Publishing, 2021.

[3] OECD. Measuring Student Knowledge and Skills: A Framework for Assessment [R]. Paris: OECD Publishing, 1999.

[4] OECD. Assessing Scientific, Reading and Mathematical Literacy: A Framework for PISA 2006 [R]. Paris: OECD Publishing, 2006.

[5] OECD. PISA 2015 Assessment and Analytical Framework: Science, Reading, Mathematic, Financial Literacy and Collaborative Problem Solving (Revised Edition) [R]. Paris: OECD Publishing, 2017.

[6] William C. Clark and Nancy M. Dickson. Sustainability Science: The Emerging Research Program [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8059-8061.

[7] Caspersen M E, Gal - Ezer J, Mcgettrick A, et al. Informatics as a Fundamental Discipline for the 21st Century [J]. Communications of the ACM, 2019, 62(4): 58.

[8] Calude C S, Longo G. The Deluge of Spurious Correlations in Big Data [J]. Foundations of Science, 2017, 22(3): 595-612.

[9] Levinson, R. Realising the School Science Curriculum [J]. The Curriculum Journal, 2018, 29(4): 522-537.

[10] Adams, J. Risk as a Social and Cultural Construction [M]. London: University College Press, 1995.

[11] Licciardone, John C. Risk Communication and Public Health [J]. British Medical Journal, 2000, 321(7267): 1026.

[12] Nasir NS, Hand V. From The Court to the Classroom: Opportunities for Engagement, Learning, and Identity in Basketball and Classroom Mathematics [J]. Journal of the Learning Sciences,

2008, 17(2): 143-179.

[13] Archer L, Dawson E, Dewitt J, et al. "Science Capital": A Conceptual, Methodological, and Empirical Argument for Extending Bourdieusian Notions of Capital Beyond the Arts [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2015, 52(7): 922-948.

[14] Moote J, Archer L, DeWitt J, et al. Science Capital or STEM Capital? Exploring Relationships between Science Capital and Technology, Engineering, and Maths Aspirations and Attitudes among Young People Aged 17/18 [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2020, 57(8): 1228-1249.

[15] Moote J, Archer L, Dewitt J, et al. Comparing Students' Engineering and Science Aspirations from Age 10 to 16: Investigating the Role of Gender, Ethnicity, Cultural Capital, and Attitudinal Factors [J]. Journal of Engineering Education, 2020, 109(1): 34-51.

[16] Moote J, Archer L, Dewitt J, et al. Who Has High Science Capital? An Exploration of Emerging Patterns of Science Capital among Students Aged 17/18 in England [J]. Research Papers in Education, 2019, 36(5): 402-422.

[17] Schenkel K, Barton A C. Critical Science Agency and Power Hierarchies: Restructuring Power within Groups to Address Injustice beyond Them [J]. Science Education, 2020, 104(3): 500-529.

[18] Schenkel K, Calabrese Barton A, Tan E, et al. Framing Equity through a Closer Examination of Critical Science Agency [J]. Cultural Studies of Science Education, 2019, 14(2): 309-325.

[19] 闫白洋. 跨学科素养测评的国际经验: PISA 命题与启示 [J]. 现代中小学教育, 2019, 35(8): 10-14.

[20] 王宇珍, 程良宏. PISA2018 阅读素养测评: 内在架构、导向特征及对我国的启示 [J]. 基础教育, 2021, 18(1): 81-91.

[21] 樊春良, 张新庆. 论科学技术发展的伦理环境 [J]. 科学学研究, 2010, 28(11): 1611-1618.

[22] 国务院教育督导委员会办公室 [EB/OL]. (2021-06-06). <http://www.xianyou.gov.cn/xyxjyj/jydd/zcfg/202008/P020200828363577128155.pdf>.

[23] OECD. Handbook - PISA - 2018 - Global - Competence [EB/OL]. (2021-06-06). <https://www.oecd.org/pisa/Handbook-PISA-2018-Global-Competence.pdf>.

[24] Kurniasih R, Sujadi I. Probabilistic Learning in Junior High School: Investigation of Student Probabilistic Thinking Levels [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 895(1): 20-28.